



Biodiversité  
Agriculture  
Alimentation  
Environnement  
Terre  
Eau



**Université Montpellier II**

**Ecole Doctorale « Systèmes Intégrés en Biologie, Agronomie,  
Géosciences, Hydrosiences, Environnement »**

Dossier de candidature pour  
Habilitation à Diriger des Recherches

**Mieux comprendre les dynamiques épidémiques pour  
optimiser le déploiement variétal :  
cas des maladies de cultures pérennes tropicales**

**Catherine ABADIE**



## Avant-propos

Le passage d'une HDR est une étape dans la carrière d'un chercheur, permettant de faire le bilan de ses travaux et proposer la suite. Pour moi, ce passage correspond à une période de transition entre un retour d'affectation (Guadeloupe) et la construction d'une nouvelle affectation sur le terrain (du moins je l'espère).

L'épidémiologie est une science qui fait appel à des champs disciplinaires divers : biologie, génétique, l'écologie utilisant des méthodologies diverses (microbiologie, biologie moléculaire, modélisation) et à des échelles d'étude variées (de la plante au paysage).

J'ai choisi cette science par sa diversité d'approches et sa proximité de la recherche appliquée. En effet, ayant suivi une double formation d'ingénieur agronome et de chercheur, j'ai souvent navigué entre des thématiques de recherche appliquée et d'autres nécessitant la compréhension plus fine de mécanismes.

Le Cirad, organisme de recherche au service du développement, où je suis chercheur depuis plus de vingtaine correspondait bien à mes attentes et m'a permis cette navigation.

## Table des matières

<b>Parcours scientifique .....</b>	<b>5</b>
Curriculum vitae .....	6
Parcours professionnel.....	8
Contrats de recherche.....	10
1. Coordination de projets de recherche .....	10
2. Participation à des projets de recherche .....	11
Encadrement .....	11
1. Formations d'étudiants (13) jusqu'au Master 1.....	11
2. Formations d'étudiants (7) de Master 2 .....	12
3. Encadrements de doctorants (3).....	12
4. Encadrement technique de doctorants (3) .....	13
5. Encadrement de Volontaire du Service Civil (VSC).....	13
Collaborations de recherche .....	14
Publications .....	14
1. Articles dans des revues à comité de lecture.....	15
2. Publications dans ouvrages scientifiques.....	18
3. Articles dans des revues sans comité de lecture.....	18
4. Communications avec actes à congrès international ou national .....	19
5. Posters à congrès international ou national (16) .....	20
6. Communications orales à congrès international ou national .....	22
Enseignement.....	22
Formations professionnelles dispensées .....	22
Animation de la recherche .....	23
1. Animation d'équipe .....	23
2. Coordination de projets .....	23
3. Animation de réseaux.....	24
4. Organisations d'atelier et de symposium (10) .....	24
Evaluation de manuscrits et jury de thèse .....	25
Expertise scientifique et technique.....	25
<b>Synthèse des travaux .....</b>	<b>27</b>
Introduction générale.....	28
1. Dynamique de maladie et effet des facteurs environnementaux .....	30
1.1 Identification de facteurs environnementaux influents .....	30

1.2 Effet des pratiques culturelles sur la sévérité de maladie .....	31
2. Dynamique de maladie et qualité des fruits .....	33
2.1 Liens entre dynamique de maladie et qualité des fruits dessert (Cavendish) .....	33
2.2 Liens entre dynamique de maladie et qualité des fruits à cuire (Plantain).....	35
2.3 Enseignement pour l'amélioration génétique .....	35
3. Dynamique de populations pathogènes et résistance quantitative .....	36
3.1 Efficacité de la résistance quantitative .....	37
3.2 Caractérisation de la résistance quantitative.....	37
3.3 Efficacité des composantes de résistance .....	41
3.4 Durabilité de la résistance quantitative .....	43
4. Dynamique de populations pathogènes émergentes .....	45
4.1 Histoire d'invasion.....	45
4.2 Compréhension des facteurs d'émergence .....	48
4.3 Enseignement épidémiologique grâce aux études sur les émergences de maladies .....	51
4.4 Expertise technique au service des réseaux d'épidémiosurveillance .....	52
<b>Projet de recherche .....</b>	<b>54</b>
Axe 1 : Caractérisation et dynamique des inoculum .....	55
Axe 2 : Mesure de la sélection par la résistance quantitative .....	57
Axe 3 : Stratégie efficace et durable de déploiement des nouvelles variétés résistantes.....	58
Axe 4 : Evaluation de méthodes de lutte efficaces et durables .....	59
Appui à la surveillance de maladie émergentes en santé végétale .....	60
Conclusion .....	60
<b>Annexes .....</b>	<b>61</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>71</b>
<b>Tirés à part.....</b>	<b>74</b>

## Parcours scientifique

## Curriculum vitae

<b>Nationalité :</b>	Française
<b>Date de naissance :</b>	06/10/1968, à Besançon (25)
<b>Situation familiale :</b>	Mariée, 1 enfant
<b>Adresse professionnelle :</b>	CIRAD, département BIOS UMR BGPI (Biologie et génétique des Interactions Plantes-Parasites) TA 54/K Campus International de Baillarguet 34398 Montpellier Cedex 5 Téléphone : (33) 04 99 62 48 84 Adresse électronique : catherine.abadie@cirad.fr
<b>Profession :</b>	Chercheur
<b>Fonction :</b>	Chercheur en phytopathologie, responsable de l'équipe de Guadeloupe de l'UMR-BGPI sur les maladies émergentes du bananier
<b>Compétences scientifiques :</b>	Pathologie végétale, épidémiologie, épidémiosurveillance, modélisation des épidémies, phénotypage pour la résistance variétale
<b>Thématiques de recherche</b>	Efficacité et durabilité des résistances variétales à des maladies fongiques, effet de l'environnement (facteurs agronomiques, édaphiques) sur le contrôle des maladies (de cultures pérennes tropicales)
<b>Pays d'expérience :</b>	<b>Côte d'Ivoire, Cameroun, Cuba</b> , Dominique, <b>Guadeloupe</b> , Martinique, Suriname, République dominicaine, Sainte-Lucie, Saint-Vincent

## Formation :

**1992-1995 : Thèse de Doctorat** en Phytopathologie, Université de Paris XI-Orsay. *La fusariose du palmier à huile : influence des facteurs édaphiques et culturaux sur la gravité de la maladie*. Thèse réalisée sous la direction de C. Alabouvette (INRA-Dijon) et la co-direction de JL Renard (CIRAD-CP). Mention Très Honorable ;

**1990-1991 : DEA** de Phytopathologie de l'Université de Paris XI-Orsay  
**Diplôme d'Ingénieur Agronome** Institut National Agronomique, Paris-Grignon

**1988-1990 : Diplôme d'Agronomie Générale**, Institut National Agronomique, Paris-Grignon

1988 : Admission au concours C à l'INA-Paris Grignon

1986-1988 : **DUT** de Génie Biologique, option Agronomie, Université de Nancy I ; major de promotion (2 ans)

1986 : **Baccalauréat**, Série D. Mention Assez Bien

## Expériences professionnelles :

**Depuis février 2019 : CIRAD-Bios, UMR-BGPI, Montpellier**

Chercheur Phytopathologiste

Positionnement dans l'équipe 5 (Biologie et Evolution des champignons Phytopathogènes)

Personne ressource pour le Cirad pour les problématiques DROM (en particulier la veille sanitaire internationale) dans la plateforme nationale d'épidémio-surveillance en santé végétale

**04/2006 – février 2019 (13 ans) : CIRAD-BIOS, Neufchateau, Guadeloupe**

Chercheur en poste en Guadeloupe

Responsable des activités de recherches sur la dynamique de populations (terrain, modélisation) et la résistance des bananiers à la cercosporiose noire du bananier (efficacité, durabilité) ; Personne ressource sur les cercosporioses du bananier pour les réseaux d'épidémio-surveillance aux Antilles et dans les Caraïbes.

**02/2002 - 04/2006 (4 ans): CIRAD-FLHOR – Montpellier, France**

Chercheur Phytopathologiste

Positionnement au laboratoire Phytrop (Montpellier), pour conduire des activités sur la cercosporiose noire des bananiers et plantains.

- Evaluation in vitro de la résistance aux cercosporioses d'hybrides créés par le Cirad.

**06/1997 - 01/2002 (5 ans): CIRAD-FLHOR – Njombé, Cameroun**

Chercheur junior - Responsable d'opérations de recherche en pathologie végétale

En poste au CRBP (Cameroun) Centre de Recherches Régionales sur Bananiers et Plantains : Pathologie végétale - Cercosporioses et parasitisme tellurique - Stratégies de lutte raisonnée contre la maladie des raies noires - Actions de recherche et de développement en milieu paysan.

**02/1996 - 05/1996 : INRA (3 mois) – Dijon, France**

Contractuel

Traitements statistiques de données et rédaction de publications scientifiques

**1994** - (3 mois) : Faculté des Sciences - Dijon - France

Contractuel Assistant technique

Travaux pratiques de biologie végétale (DEUG B)

**01/1992 - 12/1995** (4 ans): CIRAD-CP - Dijon France

Contrat doctoral

Lutte intégrée contre la fusariose vasculaire du palmier à huile : Etude de quelques facteurs édaphiques et culturaux sur la gravité de la fusariose du palmier à huile

Directeurs de thèse co-encadrée : RENARD Jean-Luc (CIRAD-CP) et ALABOUVETTE Claude (INRA Dijon)

Sujet de thèse intégré dans un projet STD3.

Missions effectuées à Dabou (Station R. Michaux - IDEFOR DPO) en Côte d'Ivoire (06-10/93, 08-10/94, 06/95) : mise en place des essais de potentiel infectieux et de réceptivité des sols à la Fusariose du palmier à huile.

**03/1991 - 09/1991** : INRA (6 mois) - Dijon France

Stade de DEA

Comparaison de la réceptivité de 11 sols tropicaux à la fusariose du palmier à huile.

Validité d'un modèle d'étude.

Responsable : ALABOUVETTE Claude (INRA Dijon)

**01/1990 - 01/1990** : Université des Sciences Biologiques (2 mois) - Bangor Royaume-Uni

Stage de recherches en laboratoire

Etude de la variabilité de *Phytophthora infestans* responsable du mildiou de la pomme de terre.

Responsable : SHAW David

**01/1988 - 01/1988** : ENSAIA - Laboratoire de Phytotechnie (2 mois) - Nancy-Vandoeuvre France

Stage d'IUT

Etude des modifications physiologiques du trèfle blanc en réponse à un stress hydrique.

Responsable : GUCKERT A.

## Parcours professionnel

Ma formation est caractérisée par une double approche : technique et recherche. Assez tôt, lors de ma formation technique (DUT et formation d'ingénieur agronome), j'ai réalisé deux stages (de 2 mois chacun) en recherche : un en 1988 à l'ENSAIA de Nancy, au Laboratoire de Phytotechnie afin d'étudier en conditions contrôlées (phytotron) les modifications physiologiques du trèfle blanc en réponse à un stress hydrique (sous la responsabilité d'A. Guckert) et l'autre en 1990 à l'Université des Sciences Biologiques, à Bangor au Pays de Galles (Royaume-Uni) afin d'étudier la variabilité de *Phytophthora infestans* responsable du mildiou de la pomme de terre (sous la responsabilité d'D.Shaw). Ces expériences (de recherche d'une part et sur les plantes d'autres part) m'ont décidée à poursuivre dans la recherche et à réaliser un DEA en phytopathologie à la place de ma 3<sup>ème</sup> année d'ingénieur. J'ai choisi mon sujet de stage de DEA en phytopathologie tropicale, ayant comme souhait de travailler pour l'agriculture tropicale. Le stage de DEA sur la réceptivité des sols à la fusariose du palmier à huile réalisée à l'INRA de Dijon a permis d'obtenir une bourse de thèse pour poursuivre le sujet en doctorat sous le co-encadrement de C.Alabouvette (INRA) et JL Renard (CIRAD).



Ma carrière d'une durée de 22 ans au CIRAD est caractérisée par une double compétence avec la réalisation simultanée d'activités de recherche et de développement. Elle peut se résumer en 4 étapes :

#### **1992-1995 : Expérience de doctorat : France-Côte d'Ivoire**

J'ai effectué ma thèse de Phytopathologie en co-encadrement entre le CIRAD et l'INRA-Dijon pour comprendre l'effet de la topographie et des plantes de couverture sur la gravité de la fusariose du palmier à huile. Les travaux ont consisté en des expérimentations menées sur le terrain en Côte d'Ivoire et en conditions contrôlées en France. Ils ont fait l'objet de 3 publications.

#### **1997-2002 : Expérience de chercheur CIRAD, au Cameroun**

Recrutée au CIRAD en 1997, j'ai été affectée au Cameroun dans un centre de recherche régional (CRBP) pendant 5 ans comme chercheur responsable des recherches sur la cercosporiose noire des bananiers. Une équipe importante (6 techniciens) était sous ma responsabilité. J'ai rempli une double fonction : (i) de Recherche sur la résistance partielle des bananiers aux cercosporioses et la dispersion du pathogène (recherche) et (ii) de Développement en apportant un appui (de développement) à la profession bananière privée (expertise, études de laboratoire) qui permettait de générer des fonds propres. Les conditions de travail ont été assez difficiles (moyens de communication limités, isolement scientifique) mais par une collaboration étroite avec J. Carlier, chercheur généticien des populations spécialisé sur les cercosporioses et par un investissement personnel (participation à projet, missions longue durée au CIRAD-Montpellier), j'ai pu maintenir une activité de recherche assez dynamique. Les travaux menés ont fait l'objet de 5 publications et 4 stages d'étudiants.

#### **2002-2006 : Expérience de chercheur au CIRAD, à Montpellier**

J'ai travaillé au CIRAD à Montpellier au sein de l'équipe 5 de l'UMR-BGPI dirigée par J. Carlier. J'ai eu la charge des études en conditions contrôlées (laboratoire, serre) sur les interactions hôte-pathogène avec l'appui d'un technicien. Cette période m'a permis de participer à la rédaction de projet de recherches et d'obtenir la responsabilité de 2 projets nationaux. Les travaux menés ont fait l'objet de 5 publications et 3 stages d'étudiants.

Cette période a permis d'initier dès 2004 des collaborations dans les Caraïbes à travers 4 missions d'expertise sur la prévention et la lutte contre la cercosporiose noire du bananier (au Suriname, en Guadeloupe, Winwards).

#### **2006-2019 : Expérience de chercheur au CIRAD, en Guadeloupe**

J'ai été basée pendant 13 ans à la station de Neufchâteau du CIRAD, en charge des recherches sur les cercosporioses du bananier aux Antilles et dans les Caraïbes et ce principalement en lien avec la résistance variétale. Deux phases différentes d'activité et de positionnement ont eu lieu :

\* de 2006 à 2010, j'ai été rattachée à une unité de recherche en Génétique des plantes UR75). Mes activités ont consisté en un appui aux généticiens du Cirad (phénotypage au champ pour la résistance) et à la profession bananière (expertises sur la lutte fongicide), et en la construction de partenariats régionaux (services d'état de la protection des végétaux) qui a abouti à la mise en place de réseaux d'épidémio-vigilance de la cercosporiose noire aux Antilles et dans les Caraïbes. Cette activité de réseaux s'est justifiée par l'expertise que j'avais sur la cercosporiose noire et le fait que la maladie était absente des Antilles. Ce contexte a permis le montage d'un projet ANR, un projet FEDER, la rédaction de 5 publications et l'encadrement de 2 stagiaires.

\* A partir de 2010, mes activités ne sont plus que des activités de recherche sur l'histoire d'invasion et la dynamique de populations en lien avec la résistance variétale à la cercosporiose noire. J'ai été rattachée à l'UMR BGPI à partir de 01/01/2011. Deux questions de recherche en épidémiologie et en modélisation nouvelles pour l'équipe sur les cercosporioses étaient ma responsabilité. Elles ont fait l'objet de 9 publications, l'encadrement de 2 thèses (dont une en Guadeloupe) et de 11 stages, l'organisation de 3 symposiums. Pour étudier la durabilité de la résistance variétale (aucune variété résistante n'est cultivée aux Antilles), j'ai été amenée à monter et coordonner de 2011 à fin 2015 un projet européen de coopération dans les Caraïbes ce qui a engendré de nombreuses missions

régionales, l'organisation de 4 séminaires régionaux et de 4 formations régionales et a assis mon expertise et ma reconnaissance régionale sur cette maladie. Cette activité de recherche a nécessité la mise en place d'une équipe en Guadeloupe et d'un partenariat solide à Cuba et République dominicaine. Compte-tenu de la crise sanitaire consécutive à l'invasion de la cercosporiose noire aux Antilles et à l'arrêt des traitements aériens, une activité d'expertise auprès des services de la direction de l'agriculture de la Guadeloupe et dans les Caraïbes et de la profession bananière a dû être menée de front. En 2017, j'ai été nommée mentor scientifique du groupe de travail sur les maladies du bananier au sein du réseau caribéen de santé des plantes (CPHD).

L'équipe de recherche en Guadeloupe est composée de 2 personnes permanentes (ingénieur de recherche, technicienne) et de personnel non permanent (une doctorante de 2011 à 2015 et VSC).

### **Depuis février 2019 : Expérience de chercheur au CIRAD, à Montpellier**

Depuis février, je suis basée dans l'équipe 5 de l'UMR-BGPI, à Montpellier avec comme objectif de poursuivre les thématiques de recherche sur l'efficacité et la durabilité de la résistance variétale des bananiers à la cercosporiose noire avec la poursuite de la responsabilité scientifique des activités menées en Guadeloupe pour l'unité et le co-encadrement d'une thèse Cirad-Anses démarrée en octobre 2017. Trois publications ont été soumises et un stage (Master 1) de 3 mois organisé.

Compte-tenu de l'expérience acquise sur la mise en place et le fonctionnement de réseaux d'épidémio-surveillance à l'échelle de la Guadeloupe et des Caraïbes, une mission de coordination pour le Cirad des échanges avec la plateforme nationale d'épidémiosurveillance nouvellement créée en Juillet 2018 m'a été confiée.

## **Contrats de recherche**

### **1. Coordination de projets de recherche**

**Depuis 2015(-2019) :** co-leader d'un workpackage du projet Etendard Agropolis E-SPACE « Improving Epidemiosurveillance of mediterranean and tropical plant diseases » <http://www6.inra.fr/e-space> projet coordonné par UMR-BGPI (C.Neema) : **Montant du projet : 900 Ke**

**2011-2015 : Co-coordinatrice d'un projet** européen de coopération régionale InterReg IV Caraïbes CABARé « Réseau Caribéen sur les maladies émergentes du bananier » <http://cabare.cirad.fr/> ; 5 partenaires de recherches : **Montant du projet : 1 200 Ke**

**2007-2008 :** Co-coordinatrice d'un projet sur les Fonds de Coopération Régionale (FCR) de la Préfecture de Guadeloupe pour organiser une formation régionale sur le diagnostic des maladies émergentes du bananier ; **Montant : 20 Ke**

**2004-2006 :** Coordinatrice du projet FCR 2004/26 sur les Fonds de Coopération Régionale (FCR) de la Préfecture de Guadeloupe pour organiser un atelier régional sur la lutte contre les cercosporioses des bananiers dans les Caraïbes ; **Montant : 35 Ke**

**2003-2004 :** Coordinatrice du projet de recherches du Ministère d'outre-mer « Evaluation de l'efficacité de la résistance de nouvelles variétés de bananes pour le contrôle de la cercosporiose jaune en Guadeloupe » **Montant : 19 Ke**

**2002-2005 :** Responsable scientifique d'un projet de recherches du Ministère de l'Agriculture-CTPS « Gestion spatiale de nouvelles variétés de bananes résistantes aux cercosporioses dans les Antilles françaises » **Montant : 34 Ke**

## 2. Participation à des projets de recherche

Participation à 27 projets dont 5 majeurs.

- 01/04/2019-31/12/2021** : projet EcoPhyto DuRéBan (Durabilité des Résistances à la cercosporiose noire de nouvelles variétés de Bananiers), coordonné par le CIRAD (UMR AGAP) et responsable d'un workpackage du projet
- 01/2014-12/2020** (en 2 tranches): FEDER-Guadeloupe « Maladies Infectieuses en santé humaine, animale et végétale », coordonné par le CIRAD (UMR AGAP) et responsable des activités de recherche sur les maladies émergentes du bananier
- 05/2018-05/2020** : FEADER-Guadeloupe « Plan Banane Durable 2 », coordonné par l'UGPBAN, groupement de producteurs de bananes des Antilles.
- 09/2015-12/2019** : Agropolis-ESPACE « Improving Epidemiosurveillance of mediterranean and tropical plant diseases » coordonné par UMR BGPI
- 03/2011–12/2015** : InterReg CABARé « Réseau Caribéen pour la prévention et le contrôle des maladies émergentes du bananier ; projet européen de coopération régionale » ; co-coordinatrice du projet
- 10/10/2007– 01/06/2011**: ANR-EMERFUNDIS “Understanding the emergence of fungal plant diseases: a step towards the assessment of global change risks” coordonné par UMR BGPI

La liste détaillée des participations à projets est présentée en annexe 1.

## Encadrement

### 1. Formations d'étudiants (13) jusqu'au Master 1

- 1998. Véronique Courtois.** M1 Maîtrise de Biologie Végétale, Université Tours. « L'incidence de *Cylindrocladium* dans les plantations paysannes et industrielles de bananiers et plantains au Cameroun »
- 1998. Thomas Peyrachon.** 2<sup>ème</sup> année d'ingénieur agronome, INA Paris Grignon. « Les systèmes d'avertissement contre la cercosporiose noire des bananiers au Cameroun » ; [Publication Actes A5](#)
- 1999. Frédéric Bernard.** 2<sup>ème</sup> année d'ingénieur CNEARC, Univ Montpellier. « Influence des conditions climatiques et parasitaires sur le remplissage du régime de plantains dans différentes situations en milieu paysan dans le sud-ouest du Cameroun » ; co-encadré avec R.Achard (CIRAD, CRBP, Cameroun)
- 2002. William Clem.** DUT Génie Biologique, IUT Auch. « Evaluation de la résistance d'hybrides de bananiers vis-à-vis des cercosporioses »
- 2004. Will Henderson.** Stage césure de l'Imperial College, Londres. « Evaluating new banana hybrid species for resistance to *Mycosphaerella* diseases ».
- 2007. Jean-François Côte.** Master professionnel de mathématiques appliquées à l'Ingénierie statistique, UFR ST Besançon, Univ. Franche-Comté. « Amélioration du système d'avertissement bioclimatique utilisé en Guadeloupe vis-à-vis de la cercosporiose des bananiers »
- 2007. Morgane Mouenne.** Stage de césure d'ingénieur agronome, ENSAIA, Nancy. « Etude de l'impact de la cercosporiose jaune du bananier sur la durée de vie verte et la qualité du fruit »
- 2010. Hélène Bardou.** DUT de Génie Biologique, IUT Auch. « Mise au point d'une méthode de quantification des inoculum de l'air de la cercosporiose jaune du bananier »  
[Publication Posters Po7 et Po14.](#)
- 2011. Maddly Montauban.** DUT de Biologie appliquée, IUT St Claude, Université Antilles-Guyane. « Caractérisation et quantification du champignon responsable de la cercosporiose jaune sur une parcelle de bananiers »  
[Publication Posters Po7 et Po14.](#)
- 2011. David Adelaïde.** Master 1 Mathématiques et Modélisation, Université Antilles-Guyane. « Mise en place d'une procédure statistique des données quantitatives d'une maladie foliaire du bananier »

- 2012. Lil Proukhnitzky.** Licence professionnelle CTCBM, IUT Dijon. « Etude de la dynamique des inoculums des agents responsables des cercosporioses du bananier: *Mycosphaerella musicola* et *Mycosphaerella fijiensis* » ; co-encadrée avec Y.Chilin-Charles (CIRAD, UMR BGPI)
- 2013. Anthony Dicanot.** Classe préparatoire MathSupBio (BCPST), Lycée de Baimbridge, Guadeloupe pour ses Travaux Individuels Pratiques et Exploratoires (TIPE) sur le thème de « Similitude et Invariance » à travers une étude sur les « conditions environnementales sur les cercosporioses du bananier en Guadeloupe »
- 2018. Mattis Valmorin.** Master 1 d'Informatique décisionnelle (3 mois), Ecole internationale des Sciences du Traitement de l'information (EISTI), « Analyses statistiques des données spatiotemporelles d'invasion de la cercosporiose noire en Guadeloupe : vers un modèle de prédiction » ; co-encadré avec Vaillant J. (Univ.Antilles)

## 2. Formations d'étudiants (7) de Master 2

- 1998. Raoul Ngueko,** Master 2 Biologie végétale, Université de Yaoundé, Cameroun. « L'incidence de *Cylindrocladium* dans les plantations paysannes et industrielles de bananiers et plantains au Cameroun »
- 2000. Aurore Ferreira** Stage de fin d'école d'ingénieur de l'université Louvain-la-Neuve, Belgique « Etude de la réceptivité des sols de bananeraie industrielle vis-à-vis du parasitisme tellurique dû aux nématodes et à *Cylindrocladium* sp. » ; co-encadré avec R.Fogain (IRAD, CRBP Cameroun)
- 2003. David Coste.** DEA Phytogénétique et interactions biologiques, Ecole nationale supérieure agronomique, Montpellier. « Isolement par la distance chez *Mycosphaerella fijiensis*, champignon responsable de la maladie des raies noires du bananier » ; co-encadré avec J.Carlier (CIRAD, UMR BGPI)
- Publication P9., deux communications orales*
- 2004. Barbara Schmaltz.** DEA Environnement tropical et Valorisation de la biodiversité, Université Antilles-Guyane « Etude à l'échelle locale, aux Antilles et au Cameroun, de la structure génétique des populations de *Mycosphaerella musicola*, agent de la maladie de Sigatoka des bananiers » ; co-encadrée avec J.Carlier (CIRAD, UMR BGPI)
- 2013. Eléa Ksiazek.** Master 2 Modélisation Statistique, UFR ST Besançon, Univ. Franche-Comté. « Modélisation de l'invasion d'un champignon phytopathogène à l'échelle régionale. Application à la Cercosporiose noire du bananier en Martinique » ; co-encadrée avec Landry C. (thésarde que j'encadrais)
- 2016. John Fritz.** Master 2 Mathématiques et Modélisation, Université des Antilles. « Théorie du renouvellement multidimensionnel : applications à la cercosporiose jaune du bananier » ; co-encadré avec Vaillant J. (Univ.Antilles)
- 2018. Guilhem Teton.** 3<sup>ème</sup> année d'ingénieur agronome, SupAgro Univ. Montpellier2. « Gestion spatiale de la cercosporiose noire des bananiers : étude de la dynamique des inoculums et effet des arrangements spatiaux »

## 3. Encadrements de doctorants (3)

- 10/2017- 2020. Thomas Dumartinet.** Thèse CIRAD-ANSES co-dirigée avec Carlier J. (Directeur de thèse, CIRAD, UMR BGPI) et Aguayo J. (ANSES, co-encadrant). Ecole doctorale GAIA, Univ. Montpellier. Thèse réalisée au CIRAD de Montpellier.
- « Epidémiologie-surveillance dans les Antilles de génotypes impliqués dans l'adaptation à des résistances variétales chez le champignon *Pseudocercospora fijiensis* causant la maladie des raies noires du bananier ».

*Publication soumise PS 3, Poster Po15, Po16*

**10/2011 à 05/2015 : Clara Landry.** Thèse CIRAD co-dirigée avec Vaillant J. (directeur de thèse, UMR LAMIA, UA) et Bonnot F. (CIRAD, UMR BGPI). Ecole doctorale, Université Antilles-Guyane ; Thèse réalisée au CIRAD en Guadeloupe.

« Modélisation d'épidémies foliaires de culture pérenne tropicale à différentes échelles spatiales : application au pilotage des variétés ». Thèse soutenue le 18/05/2015.

*Publication P18, Po10*

**10/2008 à 04/2012 : Stéphanie Robert.** Thèse CIRAD-Région Languedoc-Roussillon co-dirigée avec Carlier J. (Directeur de thèse, CIRAD, UMR BGPI) et Ravigné V. (CIRAD, UMR BGPI). Ecole doctorale SIBAGHE, Univ. Montpellier 2 ; Thèse réalisée au CIRAD de Montpellier.

« Routes d'expansion mondiale du champignon phytopathogène *Mycosphaerella fijiensis*. Conséquences sur la variabilité des traits liés à l'agressivité et le potentiel adaptatif ». Thèse soutenue le 3/04/2012.

*Publications P17, P12 et Poster Po10*

#### 4. Encadrement technique de doctorants (3)

Etant sur le terrain (Cameroun ou Guadeloupe), j'ai apporté un encadrement technique de 3 thèses.

**08/2008 à 02/2009. Florence Castelan.** Encadrement technique d'une doctorante brésilienne, en thèse à l'Université de Sao Paulo, Brésil sur « l'effet de la cercosporiose jaune sur la qualité du fruit ». Directeur de thèse : Marc Chillet (CIRAD, UMR Qualisud) ; Thèse soutenue au Brésil en 2011.

*Publications P14, P15, P16 ; une communication à congrès*

**06/1999 à 12/2000. Abdelhami El Hadrami.** Encadrement technique et scientifique d'un doctorant en thèse à la Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux, Belgique et réalisant ces travaux au CIRAD-FHLOR sur « Caractérisation de la résistance partielle et étude de l'effet de la résistance du peuplement hôte sur la structure des populations de *Mycosphaerella fijiensis* au Cameroun ». Responsabilité des travaux d'épidémiologie menés au CRBP. Directeur de thèse : P. Lepoivre (Univ. Gembloux, Belgique) et co-encadrants : Carlier J. et Mourichon X. (CIRAD, UMR BGPI). Thèse soutenue en décembre 2000.

*Posters Po1, Po3, Po4, Po5 et Acte A8,*

**09/1998-03/1999 (6 mois) : Vincent Loubacky.** Co-encadrement technique d'un doctorant en thèse à la Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux, Belgique sur « Etude de la structure génétique des populations pathogènes de *Mycosphaerella fijiensis* et *M. musicola*, agents responsables des cercosporioses au Cameroun ». Thèse stoppée fin 1999 suite à l'émigration au Canada de l'étudiant (pour raisons personnelles). Directeur de thèse : P. Lepoivre, Université de Gembloux, Belgique

*Deux communications à congrès*

#### 5. Encadrement de Volontaire du Service Civil (VSC)

**2016-2018. Yohan Trouspance.** VSC en Guadeloupe, ingénieur épidémiologiste sur la cercosporiose noire des bananiers (financé sur le projet Feder-MALIN)

*Poster Po14, Po15, Po16 ; une communication à congrès*

**2011-2013. Aurore Cavalier.** VSC en Guadeloupe, avec missions en République dominicaine et Cuba, assistante technique du projet InterReg-Cabaré

*Publication PS3, Quatre communications à congrès*

**2014-2015. Claire Durot.** VSC en Guadeloupe, assistante administrative et financière du projet InterReg-Cabaré

## Collaborations de recherche

Des collaborations internationales productives ont été établies dans 3 pays principaux : au Cameroun avec le CARBAP (Centre Africain de Recherches sur Bananiers et Plantains) où j'ai travaillé pendant 5 ans, en République dominicaine avec l'IDIAF (institut de recherches agronomiques), à Cuba avec le CENSA (centre de recherche en santé animale et végétale), l'INISAV (institut de santé végétale), INIVIT (institut de recherches agronomiques sur racines et tubercules) qui étaient partenaires du projet européen que j'ai coordonné. Ces collaborations ont permis de monter des projets de recherches collaboratifs, de produire des articles scientifiques et communications scientifiques, des chapitres d'ouvrage (récemment en 2018 et 2019) et d'encadrer des stagiaires. Participant au réseau mondial sur les bananiers (ProMusa) coordonné par Bioversity (ex INIBAP), des collaborations ponctuelles sont réalisées avec Bioversity (CGIAR) comme une récente pour publier un guide technique sur le phénotypage des bananiers vis-à-vis de maladie. Une collaboration récente est en cours de construction avec l'Université de Stellenbosch (avec des premiers échanges scientifiques en 2018) sur la prévention d'une nouvelle maladie du bananier.

Au niveau national, une collaboration a été établie avec l'ANSES (développement d'outil de diagnostic) qui a abouti au co-encadrement (Aguayo J.) actuel d'une thèse, mais aussi l'Université des Antilles (avec Jean Vaillant) qui a donné lieu au co-encadrement d'une thèse et de stagiaires, le montage de projet de recherches (Feder-Malin), l'organisation de 3 symposium et la participation à de l'enseignement. Des collaborations ont été établies en interne CIRAD avec 4 généticiens sur bananiers (Jenny C., Tomekpe K., Salmon F., Carrel C.), des agronomes et qualitiens sur bananiers de l'UR-GECO (L. de Lapeyre) et l'UMR-Qualisud (M. Chillet). Elles ont fait l'objet de montage de projets collaboratifs et de publications.

## Publications

La production scientifique totale est résumée ci-dessous :

### Synthèse des publications et communications à congrès

Production scientifique	1995-2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	TOTAL	2013-2019
Articles à comité de lecture	6	2	1	2	1	2	2	1	1		1		2**	19	5
Article sans comité de lecture	5		3											8	0
Communications avec actes	11	1	1	2										15	0
Communications orales à congrès	13		1	2	1	3	9	2	1	2	4	4		42	22
Poster dans congrès	5				1	2	2		2	1	1	1	1	16	8
Ouvrage scientifique et technique	1											1	2*	4	4
Total	41	3	6	6	3	7	13	3	4	3	6	6	3	104	39

Articles à comité de lecture	6	2
Article sans comité de lecture	5	
Communications avec actes	11	1
Communications orales à congrès	13	
Poster dans congrès	5	
Ouvrage scientifique et technique	1	
<b>Total</b>	<b>41</b>	<b>3</b>
* : sous presse à Quae et Bioversity (en 2019)		
** : article soumis au moment du dépôt du mémoire		

104 productions depuis l'obtention du doctorat en 1995 dont 39 productions au cours des 5 dernières années (depuis 2013) soit 37% de la production totale.

Dans cette production, 26 % sont des articles avec et sans comité de lecture et 70.1% des communications à congrès (73 communications) majoritairement internationaux (72%) dont 21% (soit 15) avec des actes écrits, 21% (soit 16) des posters et 56% (soit 42) communications orales.

Depuis 2010, plus aucun acte à congrès ou articles sans comité de lecture n'a été rédigé. Ainsi au cours des 5 dernières années (depuis 2013), la production correspond à 13% d'articles à comité de lecture passant à 20% avec les articles soumis (8/39), 77% de communications à congrès (orales ou poster) et 8 % de chapitres d'ouvrage. Cette part importante de communications à congrès s'explique par mon investissement dans l'organisation de séminaires en Guadeloupe et ma participation à des réseaux régionaux en santé des plantes et ce particulièrement depuis 2013. La publication de chapitres d'ouvrages est la conséquence de l'implication dans des réseaux internationaux et la reconnaissance de l'expertise scientifique sur les cercosporioses du bananier.

## 1. Articles dans des revues à comité de lecture

Dix neuf articles ont été publiés dans des revues à comité de lecture dont 18 articles dans des revues indexées soit environ 0.8 article/an et un rendement de 1 article/an depuis 2013. Deux ont été soumises au 1<sup>er</sup> trimestre 2019.

Les revues ont des facteurs d'impact (réf 2016/2018) de 0.31 à 6.086.

Sept articles ont été produits en 1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> auteur et en dernier auteur (en 2017).

Revue avec comité de lecture	Facteur impact (2016/2017)	Nombre	Année de publication	Nombre en 1er ou dernier auteur	1er, 2ème ou dernier auteur
Plantations, Recherches et Développement	x	1	1996	1	1
FEMS Microbiology Ecology	3,72	1	1997		
Soil Biology and Biochemistry	4,857	1	1998	1	1
Cahiers de l'Agriculture	0,64	1	2001		
Fruits	0,634	5	2002,2008,2010,2013	1	2
Molecular Ecology	6,086	3	2004,2010,2012		
Crop Protection	1,834	2	2009, 2013		2
Plant Disease	3,173	1	2011		
AoB PLANTS	2,238	1	2012		
Canadian Journal of Plant Pathology	1,124	1	2014		
Revue d'Ecologie- La Terre et la Vie	0,31	1	2015		
Ecological Modelling	2,507	1	2017	1	1
Molecular Biology and Evolution	10,217	1*	2019		
Plos One	2,766	1*	2019		
		<b>19</b>		<b>4</b>	<b>7</b>

\* : articles soumis au moment du dépôt du mémoire mais non décomptés dans les bilans/sommes

#### • Liste des articles dans des revues indexées:

- P18. Landry C., Bonnot F., Ravigné V., Carlier J., Rengifo D., Vaillant J., **Abadie C. 2017**. A foliar disease simulation model to assist the design of new control methods against Black Leaf Streak disease of banana. *Ecological Modelling* 359, p383-397
- P17. Robert S., Zapater MF, Carlier J., **Abadie C.**, Ravigné V. **2015**. Multiple introductions and admixture at the origin of the continental spread of the fungal banana pathogen *Mycosphaerella fijiensis* in Central America: a statistical test using Approximate Bayesian Computation. *Revue d'Ecologie- La Terre et la Vie* 70 (sup. 12), p127-138
- P16. Chillet M., Castelan FP., **Abadie C.**, Hubert O., Chilin- Charles Y., de Lapeyre de Bellaire L. **2014**. Effect of Different Levels of Severity of Sigatoka Disease on Banana Pulp Color and Early Ripening. *Canadian Journal of Plant Pathology* 36 (1), p48-53.
- P15. Chillet M., Castelan FP., **Abadie C.**, Hubert O., de Lapeyre de Bellaire L. **2013**. Necrotic leaves removal: a key component of integrated management of *Mycosphaerella* leaf spot diseases to improve the quality of bananas: the case of Sigatoka disease. *Fruits* 68 (4), p271-277.
- P14. Castelan FP., **Abadie C.**, Hubert O., Chilin- Charles Y., de Lapeyre de Bellaire L., Chillet, M. **2013**. Relation between the severity of Sigatoka Disease on banana quality characterized by pomological traits and fruits green life. *Crop Protection* 50, p61-65.
- P13. Passos M., de Oliveira Cruz V, Emediato FL, de Camargo Teixeira C, Souza MT Jr, Matsumoto T, Renno' Azevedo VC, Ferreira CF, Amorim EP, de Alencar Figueiredo LF, Martins NF, de Jesus Barbosa Cavalcante M, Baurens F-C, da Silva OB Jr, Pappas GJ Jr, Pignolet L, **Abadie C**, Ciampi AY, Piffanelli P, Miller RNG. **2012**. Development of expressed sequence tag and expressed sequence tag-simple sequence repeat marker resources for *Musa acuminata*. *AoB PLANTS* 2012 (pls030): 20p.; DOI :10.1093/aobpla/pls030



- P12. Robert S., Ravigné V., Zapater M-F, **Abadie C.**, Carlier J. **2012**. Contrasting introduction scenarios among continents in the worldwide invasion of the banana fungal pathogen *Mycosphaerella fijiensis*. **Molecular Ecology** 21 (5), p1098-1114.
- P11. Ioos R. and Hubert J., **Abadie C.**, Duféal D., Opdebeeck G., Iotti J. **2011**. First report of Black Sigatoka disease caused by *Mycosphaerella fijiensis* on Martinique Island. **Plant Disease** 95 (3), p359.
- P10. De Lapeyre de Bellaire L, Fouré E., **Abadie C.**, Carlier J. **2010**. Black leaf streak disease is challenging the banana industry. **Fruits** 65 (6), p327-342.
- P9. Halkett F., Coste D., Rivas G., Zapater M-F, **Abadie C.**, Carlier J. **2010**. Genetic discontinuities and disequilibria in recently established populations of the plant pathogenic fungus *Mycosphaerella fijiensis*. **Molecular Ecology** 19, p3909-3923.
- P8. Chillet M., **Abadie C.**, Hubert, O., Chilin-Charles, Y., de Lapeyre de Bellaire L. **2009**. Sigatoka disease reduces the greenlife of bananas. **Crop Protection** 28, p41-45.
- P7. **Abadie C.**, Zapater MF, Pignolet L. Carlier J., Mourichon X. **2008**. Artificial inoculation on plants and banana leaf pieces with *Mycosphaerella* spp. responsible to Sigatoka leaf spot diseases. **Fruits**, 63 (5), p319-323.
- P6. Zapater MF, **Abadie C.**, Pignolet L., Carlier J., Mourichon X. **2008**. Diagnosis of *Mycosphaerella* spp. responsible to *Mycosphaerella* leaf spot diseases of bananas and plantains through morphotaxonomic observations. **Fruits** 63 (6), p389-393
- P5. Rivas G., Zapater MF, **Abadie C.**, Carlier J. 2004. Founder effects and stochastic dispersal at the continental scale in the fungal pathogen of banana *Mycosphaerella fijiensis*. **Molecular Ecology** 13 (2) p471-482.
- P4. Pierrot J., Achard R., Temple L., **Abadie C.**, Fogain R. **2002**. Déterminants de la production de plantains dans le sud-ouest du Cameroun : intérêt d'un observatoire. **Fruits** 57 (2), p75-86.
- P3. Noupadja P., Tchango Tchango J., **Abadie C.**, Tomekpe K. **2001**. Evaluation de cultivars exotiques de bananiers au Cameroun. **Cahiers de l'Agriculture** 10, p19-24.
- P2. **Abadie C.**, Edel V., Alabouvette C. **1998**. Soil suppressiveness to fusarium wilt : influence of a cover-plant on density and diversity of *fusarium* populations. **Soil Biology and Biochemistry**, 30 (5), p643-649.
- P1. Steinberg C., Edel V., Gautheron N., **Abadie C.**, Vallayes T., Alabouvette C. **1997**. Phenotypic characterization of natural populations of *Fusarium oxysporum* in relation to genotypic characterization. **FEMS Microbiology Ecology**, 24, p73-85.
- P0. **Abadie C.**, de Franqueville H., Renard J.L., Alabouvette C. **1996**. Influence de quelques techniques culturales sur la gravité de la fusariose du palmier à huile ; **Plantations Recherche et Développement**, 3 (4), p259-271 ; cette revue était à comité de lecture mais sans facteur d'impact.

Les principaux tirés à part des publications P2, P5, P12, P14 et P18 sont présentés en annexe 1.

- **Liste des articles soumis au moment du dépôt du mémoire**

PS1. Carlier J., Zapater M-F. Bonnot F., Roussel V., Habas R., Ravel S., Martinez T, Perez-Vicente L., **Abadie C.**, Wright S. Convergent adaptation to quantitative host resistance in a major plant pathogen. Soumise à *Molecular Biology and Evolution* (février 2019)

PS2. Yonow T., Ramirez-Villegas J., **Abadie C.**, Darnell RE., Noboru Ota, Kriticos DR. Black leaf streak disease of bananas: Ecoclimatic suitability and relationship with disease pressure assessments. Soumise à *Plos One* (mars 2019)

PS3. Cavalier A., Perez Vicente L., Rengifo D., Minière L., Lescot T., **Abadie C.** Environmental factors affect the severity of black leaf streak disease on partially resistant banana hybrids. A soumettre à *Plant Pathology* (mai 2019)

## 2. Publications dans ouvrages scientifiques

O4. Mouliom Pefoura M., **Abadie C.**, Kwa M. **2019**. Chapitre « Lutte contre les maladies des feuilles et des fruits ». In : Le bananier plantain : Enjeux économiques, alimentaires et agronomiques ; QUAE editors ; (sous presse)

O3. Perez-Vicente L. and Carreel F., Roussel V., Carlier J., **Abadie C.** **2019**. Technical guidelines for Black Leaf Streak Disease assessment of bananas. Bioversity editor ; (sous presse)

O2. Guzmán M., Pérez-Vicente L., Carlier J., **Abadie C.**, de Lapeyre de Bellaire L., Carreel F., Marín D.H., Romero R.A., Gauhl F., Pasberg-Gauhl C., Jones DR. **2018** ; Black leaf streak. In: Handbook of diseases of banana, Abacá and Enset. Jones, David R. (ed.). Wallingford: CABI, 41-115. ISBN 978-1-78064-719-7.

O1. El Hadrami A., **Abadie C.**, Carlier J. **2003**. Evaluation de la résistance partielle du bananier à la maladie des raies noires [Encadré 13.4]. In : Lepoivre Philippe. *Phytopathologie : Bases moléculaires et biologiques des pathosystèmes et fondements des stratégies de lutte*. Bruxelles : De Boeck Université, p. 279.

## 3. Articles dans des revues sans comité de lecture

		Nombre	Année de publication	Nombre en 1er auteur
Articles dans Revues sans comité de lecture		8	1999 à 2009	4

### • Liste des articles dans des revues sans comité de lecture

PSCL8. **Abadie C.**, Chilin-Charles, Y., Huat, J., Salmon, F., Pignolet, L., Carlier, J., Lescot, T., Côte, F. and Jenny, C. **2009**. New approaches to select cultivars of banana with durable resistance to *Mycosphaerella* leaf spot diseases. In: Jones D. and van den Berg I. (eds.). *Proceedings of the first ISHS/ProMusa Symposium on Recent advances in banana crop protection for sustainable production and improved livelihoods*, 10-14 septembre 2007, White River, Afrique du Sud. *Acta Horticulturae* 828:171-178.

PSCL7. de Lapeyre de Bellaire, L., Essoh Ngando, J., **Abadie C.**, Chabrier, C., Blanco, R., Lescot, T., Carlier, J. and Côte, F. **2009**. Is chemical control of *Mycosphaerella* foliar diseases of banana

- sustainable? Jones D. and van den Berg I. (eds.). *Proceedings of the first ISHS/ProMusa Symposium on Recent advances in banana crop protection for sustainable production and improved livelihoods*, 10-14 septembre 2007, White River, Afrique du Sud. **Acta Horticulturae** 828:161-170
- PSCL6. Côte F.X., **Abadie C.**, Achard R., Cattani P., Chabrier C., Dorel M., de Lapeyre de Bellaire L., Risède J.M, Salmon F., Tixier P. **2009**. Integrated pest management approaches developed in the French West Indies to reduce pesticide use in banana production systems. Jones D. and van den Berg I. (eds.). *Proceedings of the first ISHS/ProMusa Symposium on Recent advances in banana crop protection for sustainable production and improved livelihoods*, 10-14 septembre 2007, White River, Afrique du Sud. **Acta Horticulturae** 828:375-382
- PSCL5. **Abadie C.**, Pignolet L., Elhadrami A., Habas R., Zapater M.F., Carlier C. 2005. Inoculation avec *Mycosphaerella* sp., agent de cercosporioses, de fragments de feuilles de bananiers maintenus en survie. **Cahier des Techniques de l'INRA** ; Numéro spécial « Méthodes d'appréciation du comportement variétal vis-à-vis des bioagresseurs », p131-134.
- PSCL4. Cohan J.P., **Abadie C.**, Tomekpe K et Tchango Tchango J. 2003. Evaluation des performances agronomiques et de résistance à la maladie des raies noires de l'hybride de plantain CRBP 39 du CARBAP. Résultats du 1<sup>er</sup> cycle de culture ; **Infomusa** 12 (1) p29-32.
- PSCL3. **Abadie C.**, Bakry F., Carlier J., Caruana M.L., Côte F., Ganry J., Lescot T., Marie P., Sarah J.L. 2003. Dossier du mois bananes for ever : la banane et le concept d'agriculture raisonnée ; l'amélioration génétique des bananiers ; les maladies et ravageurs des bananiers. **Fruitrop** (99): 3-11.
- PSCL2. **Abadie C.**, El Hadrami A., Rivas G., Zapater M.F., Carlier J. 2001. Studies of *Mycosphaerella fijiensis* population structure and of partial resistance of bananas. Promusa V. **Infomusa** 10 (1).
- PSCL1. Carreel F., **Abadie C.**, Carlier J., Tomekpe K., Lagoda P., Bakry F. 1999. Cartographie du génome et analyse génétique de la résistance à la maladie des raies noires chez les bananiers. **Infomusa**, 8 (1) : II-III International Symposium on the Molecular and Cellular Biology of Banana, 1999-03-22/1999-03-25, Ithaca, Etats-Unis.

#### 4. Communications avec actes à congrès international ou national

Quinze actes ont été présentés à congrès internationaux (13) et nationaux (2) entre 1995 et 2010.

		Nombre	Année de publication	Nombre en 1er auteur
Actes à congrès		15	1995 à 2010	4

- **Liste des actes à congrès** (le participant au congrès est souligné).

- A15. de Lapeyre de Bellaire L., Fouré E., **Abadie C.**, Carlier J. 2010. Fighting against an emerging disease. The case of black leaf streak disease in the banana industry. In: *Proceedings of the XIXth ACORBAT meeting*, 8-12 novembre 2010, Medellin, Colombie, p70-84.
- A14. Teycheney P.Y., **Abadie C.**, Iotti J. 2010. Development of surveillance networks, data exchanges and joint response strategies in the Caribbean: the French experience In : *Proceedings of the 45nd Annual Meeting of the Caribbean Food Crop Society, Basse Terre, St Kitts et Nevis, July 12-15, 2009*. s.l. : s.n., [6] p. Annual Meeting of the Caribbean Food Crops Society (CFCS). 45, 2009-07-12/2009-07-15, Basse Terre, St Kitts et Nevis.
- A13. Wicker E., **Abadie C.**, Daugrois J.-H., Baudoin L., Dollet M., Zapater M.-F., Vuillaume C., Teycheney P.-Y. 2009. CIRAD invasive species initiatives in the Caribbean basin. *Proceedings of the 44th annual meeting of the Caribbean Food Crop Society (CFCS)*, Miami, Etats-Unis, 2008-07-

- 15/2008-07-18, s.l. : s.n., [10] p. Annual Meeting of the Caribbean Food Crops Society (CFCS). 44, 2008-07-15/2008-07-18, Miami, Etats-Unis.
- A12. **Abadie C.**, Hubert O., Ngando J. E., Ngho G., Mbéguié-A-Mbéguié D., De Lapeyre de Bellaire L., Chillet M. 2008. Evidence of the effects of *Mycosphaerella* leaf spot diseases on fruit quality. In : by J.S. Borja ; C. Nogales ; C. Orrantia ; R. Paladines ; V. Quimi and L. Tazan (eds.). *Memories of XVIII ACORBAT meeting*, 10-14 November 2008, Guayaquil, Ecuador. s.l. : s.n., [10] p. International Meeting ACORBAT 2008. 18, 2008-11-10/2008-11-14, Guayaquil, Equateur.
- A11. de Lapeyre de Bellaire L., Ngando J., **Abadie C.**, Carlier J., Lescot T., Fouré E. 2006. Management of Black Sigatoka in Cameroon. In: Soprano E., Tcacendo F.A., Lichtemberg L.A., Silva M.C. (eds.) *Memories of XVIIth ACORBAT meeting : Banana a sustainable business*, 15-20 octobre 2006, Joinville, Brésil, (1), p122-132.
- A10. Vuillaume C., Hendriks P., Teycheney P.Y., **Abadie C.**, Dollet M., Daugrois J.H., Palloix A., Urbino C., Langlais C., Wicker E., Vernière C., Martinez D., Lefrançois T., Molia S. 2006. French overseas departments pest surveillance and detection activities in the Caribbean Region. In : *42nd Annual Meeting of the Caribbean Food Crop Society*, San Juan, Puerto Rico, July 9-15, 2006. 6 p.
- A9. Carlier J., Hayden H., Rivas G.G., Zapater M.F., **Abadie C.**, Aitken E.A.B. 2003. Genetic differentiation in *Mycosphaerella* leaf spot pathogens. p123-129. In *Proceedings of the 2th workshop on Mycosphaerella leaf spot diseases of bananas: present status and outlook*, Jacome L., Lepoivre P., Marin D., Ortiz R., Romero R. and Escalant JV editors, Montpellier, France. 317p.
- A8. **Abadie C.**, El Hadrami A., Fouré E., Carlier J. 2003. Efficiency and durability of partial resistance components of bananas against black leaf streak disease. 161-168. In *Proceedings of the 2th workshop on Mycosphaerella leaf spot diseases of bananas: present status and outlook*, Jacome L., Lepoivre P., Marin D., Ortiz R., Romero R. and Escalant JV editors, Montpellier, France. 317p.
- A7. Mouliom Pefoura A., Tomekpe K., Fouré E., **Abadie C.**, Youmbi E. et Noupadja P. 2002. Apport des biotechnologies dans le contrôle des contraintes parasitaires de la culture des bananiers et plantains en Afrique de l'ouest et du Centre. In *Animation Régionale du Réseau Bio Vég.*, Lomé, Togo, 31/3 – 7/4/02. 10 p
- A6. Tomekpe K., Noupadja P., **Abadie C.**, Tchango Tchango J., Youmbi E. 1999. Amélioration génétique des plantains pour la sécurité alimentaire et l'export. In CMF Mbofung and FX Etoe (eds), *Biosciences proceedings*, ISSN 1019-7702, vol 6, p 444-454.
- A5. **Abadie C.**, Peycharon T., Fouré E. 1999. Lutte intégrée contre la maladie des raies noires des bananiers au Cameroun. Développement d'un système d'avertissement agricole. In CMF Mbofung and FX Etoe (eds), *Biosciences proceedings*, vol 6, ISSN 1019-7702, p 22-31.
- A4. Fogain R., Mouliom Pefoura A., **Abadie C.**, Tomekpe K., Escalant JV. 1999. Banana and plantain IPM in Cameroon : progress and problems ; In *Mobilizing IPM for sustainable banana production in Africa : Proceedings of Banana IPM workshop*, p 271-280, Frison E.A., Gold CS, Karamura EB and Sikora RA Editors Nelspruit, South Africa, 23-28/11/98.
- A3. Fogain R., Fouré E., **Abadie C.** 1998. Root disease complex of bananas and plantains in Cameroon, p 168-175 In *Proceedings of International Seminar on Plantain Production*, Eds Cardona, Carvajal, Salinas, Isaza, Armenia, Colombia, 4-8 Mai 1998.
- A2. Tomekpe K., Noupadja P., **Abadie C.**, Auboiron E., Tchango Tchango J. 1998 ; Genetic improvement of plantains at CRBP : performance of black sigatoka resistant plantain hybrids, p 45-50 In *Proceedings of International Seminar on Plantain Production*, Eds Cardona, Carvajal, Salinas, Isaza, Armenia, Colombia, 4-8 Mai 1998.
- A1. **Abadie C.**, De Franqueville H., Alabouvette C. 1995. Influence of cultural practices on level of soil receptivity fusarium wilt. In : Manka M. (ed.); EFPP. *Environmental biotic factors in integrated plant disease control*. Poznan : Polish Phytopathological Society, p.157-160 *Environmental Biotic Factors in Integrated Plant Disease Control*. 3, 1995.

## 5. Posters à congrès international ou national (16)

Treize posters à congrès internationaux et 3 à congrès nationaux ont été présentés de 1998 à 2019.

		Nombre	Année de publication	Nombre en 1er auteur	Nombre en dernier auteur
Posters à congrès internationaux		13	1998 à 2019	4	5

- **Liste des posters présentés dans des congrès** (le participant au congrès est souligné).

Po1. El Hadrami E., Zapater MF, Lapeyre F., **Abadie C.**, Mourichon X., Carlier J. 1998. A leaf disk assay to assess partial resistance of banana germplasm and aggressiveness of *Mycosphaerella fijiensis*, the causal agent of black leaf streak disease. In *Proceeding of 7<sup>th</sup> International Conference of Plant Pathology*, Edinburgh, Ecosse 9-16/8/98, volume 2, n° 2.1.24

Po2. Abadie C., Carreel F., Tomekpe K., Carlier J. Fouré E., Escalant JV, Bakry F. 1998. Genetic determinism and inheritance of resistances against black leaf streak (*Mycosphaerella fijiensis*) in bananas ; In *7<sup>th</sup> International Conference of Plant Pathology*, Edinburgh, Ecosse, 9-16/8/98, volume 3, n° 3.4.37 (poster) et (1998) and In *Symposium international sur les productions bananières* «Un enjeu économique pour la sécurité alimentaire», Douala, Cameroun

Po3. Abadie C., El Hadrami A., Carlier J. 2000. Banana partial resistance against *Mycosphaerella fijiensis* : studies of efficiency and durability ; *Symposium on Durable Disease Resistance*, Wageningen, The Netherlands, 28/11-1/12/2000, p 47

Po4. Abadie C., El Hadrami A., Carlier J. 2001. Etude de l'efficacité et de la durabilité de la résistance partielle des bananiers vis-à-vis de *Mycosphaerella fijiensis* ; *5<sup>ème</sup> congrès de la Société Française de Phytopathologie*, Angers, France, 26-29/03/2001, p 49

Po5. Abadie C., El Hadrami A., Pignolet L., Nguidjo O., Zapater MF., Carlier J. 2003. Resistance to black leaf streak disease of banana : studies on efficiency and durability of partial resistance ; *8<sup>th</sup> International Congress of Plant Pathology*, Christchurch, Nouvelle-Zélande, 2-7/02/03, p 353

Po6. Robert S., Rieux H., Halkett F., Zapater MF, De Lapeyre L., **Abadie C.**, Ravigné V., Carlier J. 2011. Dispersal processes underlying the recent pandemic caused by the plant pathogenic fungus *Mycosphaerella fijiensis*. In *26<sup>th</sup> Fungal Genetics conference*, Asilomar, USA, 5-10/03/2011

Po7. Chilin-Charles Y., Bardou H., Montauban M., C. **Abadie C.** 2012. Mise au point de méthodes de quantification microscopique et moléculaire des inoculums conidiens et ascospores de la cercosporiose jaune des bananiers. *Journées Jean Chevaugnon, 9<sup>ème</sup> Rencontres de Mycologie-Phytopathologie*, Aussois, France 16-19/01/2012.

Po8. Béal C., Pitarch A., Lombion K., Jacoby-Koaly C., Carlier J., **Abadie C.** 2012. Peut-on éviter l'invasion de la Guadeloupe par *Mycosphaerella fijiensis*, champignon parasite du bananier ? *10<sup>ème</sup> Conférence Internationale sur les Maladies en Agriculture*, Tours, France, 3-5/12/2012

Po9. Teycheney P.Y., Perez Vicente L., Javer Higginson E., Gómez Kosky R., Folgueras Montiel M., Morales Romero L., Teresa Martinez R., Renfingo D., Lescot T., Carlier J., **Abadie C.** 2013. Cabaré: Caribbean network for the prevention and sustainable control of emerging diseases of banana. In : eds. Borges A.L. , Lichtemberg L. *Proceedings of the 20th international meeting ACORBAT: 40 years sharing science and technology*, Fortaleza, Brazil, 9-13/09/2013. p265.

Po10. Landry C., F.Bonnot, V.Ravigné, J.Carlier, J.Vaillant, **Abadie C.** 2013. Simulation model to assess the efficacy of host partial resistance: case of black leaf streak disease on banana. In *International conference on Stochastic Models in Ecology, Evolution and Genetics*, Angers, France, 9-13/12/2013

- Po11. Carlier J., Zapater M-F, Bieysse D., Montero Y., Roussel V., Habas R., Martinez T, Perez-Vicente L., **Abadie C.** and Wright S. 2015. Is there selection by quantitative resistances in the banana fungal pathogen *Mycosphaerella fijiensis*? *28<sup>th</sup> Fungal Genetics*, Pacific Grove, CA USA, 17-22/03/2015
- Po12. Carlier J., Zapater M.F., Bieysse, Montero Y., Roussel V., Habas R., Martinez T., Pérez Vicente L., **Abadie C.**, Wright S. 2015. Host adaption in the plant pathogenic fungus *Mycosphaerella fijiensis*. *Conference of the Society Molecular Biology and Evolution (SMBE)* "Investigating biological adaptation with NGS: data and models ", Vienne, Autriche, 12-16/07/2015
- Po13. Morales L., Rengifo D., Pérez Vicente L., Dávila Martínez A., Espinosa A., Folgueras Montiel M., Montero Y., Martínez de la Parte E., Suárez P., Martínez T., Lescot T., **Abadie C.** 2016. Resistance efficacy of new bananas hybrids and impact of fertilization on Black Sigatoka severity. *Proceedings of the XXI<sup>th</sup> international meeting of ACORBAT*, 19-22/04/2016, Miami, USA.
- Po14. Chilin-Charles Y., Trouspance Y., Bardou H., Montauban M., **Abadie C.** 2017. Spatiotemporal dynamics of inoculums of Sigatoka disease of banana at plot and plant scales ; *12<sup>th</sup> conference of European Foundation for Plant Pathology and 10<sup>th</sup> French Society for Plant Pathology*, 29/05-02/06/2017, Dunkerque, France.
- Po15. Dumartinet T., Picard L., Ravel S., Bonnot F., Zapater MF, Bieysse D., Roussel V., Habas R., Lubin N., Chilin-Charles Y., Trouspance Y., Aguayo J., **Abadie C.**, Carlier J. 2018. Epidemiosurveillance in the French West Indies of genotypes involved in the adaptation to varietal resistances in the fungus *Pseudocercospora fijiensis* causing the black leaf streak disease of banana. *Journées Jean Chevaugnon, 12<sup>ème</sup> Rencontres de Mycologie-Phytopathologie*, Aussois, France 15-19/01/2018.
- Po16. Dumartinet T., Ravel S., Bonnot F., Roussel V., Lubin N., Chilin-Charles Y., Trouspance Y., Aguayo J., **Abadie C.**, Carlier J. 2019. Epidemiosurveillance in the French West Indies of genotypes involved in the adaptation to varietal resistances in the fungus *Pseudocercospora fijiensis* causing the black leaf streak disease of banana. In *30<sup>th</sup> Fungal Genetics conference Asilomar*, USA, 11-15/03/2019.

## 6. Communications orales à congrès international ou national

La liste des 42 communications à congrès internationaux (26) et nationaux (16) est présentée en annexe 3.

## Enseignement

Des cours ont été dispensés de façon occasionnelle sur Montpellier et dz façon plus régulière en Guadeloupe.

**2002-2004** : Un à deux cours par an en Master 1 et 2 (ENSAM, Agro Paris Tech)

**2007** : Un cours en BTS Agricole, Baie-Mahault, Guadeloupe

**2010-2013** : 8h/an dans le module « Surveillance et Lutte intégrée contre les maladies végétales » du Master 2 EcoTrop, Université Antilles Guyane

**2018** : 2h/an sur « Epidemiosurveillance en santé végétale : exemples aux Antilles françaises », 1<sup>ère</sup> année SupAgro-Montpellier

## Formations professionnelles dispensées

Neuf formations ont été organisées et dispensées au Cameroun, en Guadeloupe, dans les Winwards et à Montpellier.

- 01/2018** : Organisation d'un atelier technique sur « Analyse des données des réseaux d'épidémiologie en santé végétale » à Montpellier, 10 participants (chercheurs, ingénieurs) ; Financement sur projet E-SPACE
- 04/2014** : Formations pratiques en Martinique (avril 2014) et en Guadeloupe (mai 2014) à 12 partenaires professionnels (IT<sup>2</sup>, Serviproban, Sica-TG) au protocole d'évaluation de l'efficacité de la résistance de l'hybride 925 ; Financement sur projet Plan Banane Durable2
- 10/2012** : Formation pratique (7 personnes, 1 jour) en Dominique au diagnostic microscopique des cercosporioses du bananier ; Financement sur projet InterReg CaBaRé
- 12/2010** : Formation régionale (60 personnes, 2 jours) en Martinique à la reconnaissance des symptômes de cercosporiose ; Financement sur projet InterReg CabaRé
- 04/2010** : Formation en Guadeloupe (14 personnes, 1 semaine) aux diagnostics des cercosporioses pour les services d'état de la protection des végétaux des DOM ; Financement sur projet InterReg Cabaré
- 02/2008** : Formation à Montpellier (6 personnes, 1 semaine) aux diagnostics moléculaires des cercosporioses pour les services d'état de la protection des végétaux des DOM ; Formation payante.
- 01/2008** : Formation régionale en Guadeloupe (5 personnes, 1 semaine) au monitoring de résistance aux fongicides et diagnostic microscopique pour les services des ministères de l'agriculture des Winwards ; Financement sur projet Fonds de Coopération Régionale de la Préfecture de Guadeloupe
- 11/2004** : Formation théorique et pratique à Ste Lucie, St Vincent et Dominique (1 jour/pays ; 30 personnes/pays) à la reconnaissance des cercosporioses ; Financement sous forme d'expertise pour le compte de Wibdeco (Ste Lucie).
- 06/1998** : Formation théorique et pratique au Cameroun de 3 personnes (pendant 3 semaines) à l'évaluation de la résistance des populations pathogènes aux fongicides utilisés en bananeraie. Financement sous forme d'expertise pour le compte de l'OCAB (Côte d'Ivoire).

## Animation de la recherche

### 1. Animation d'équipe

- 2006-2018** : Animatrice de l'équipe de l'UMR-BGPI en Guadeloupe autour de 4 questions de recherches sur les cercosporioses des bananiers : dispersion et facteurs d'émergence ; dynamique de populations ; efficacité de la résistance ; durabilité de la résistance
- 1997-2001** : Co-responsable de l'équipe de Phytopathologie du Centre de Recherches sur Bananiers et Plantains (CRBP), Njombé, Cameroun

### 2. Coordination de projets

- Depuis 2015(-2019)** : co-leader d'un workpackage du projet Etendard Agropolis E-SPACE « Improving Epidemiological surveillance of mediterranean and tropical plant diseases »  
<http://www6.inra.fr/e-space> projet coordonné par UMR-BGPI (C.Neema)
- 2011-2015** : Co-coordinatrice d'un projet européen de coopération régionale InterReg IV Caraïbes CABARé « Réseau Caraïbéen sur les maladies émergentes du bananier » <http://cabare.cirad.fr/> ; 5 partenaires de recherches
- 2007-2008** : Co-coordinatrice d'un projet sur les Fonds de Coopération Régionale (FCR) de la Préfecture de Guadeloupe pour organiser une formation régionale sur le diagnostic des maladies émergentes du bananier
- 2004-2006** : Coordinatrice du projet FCR 2004/26 (Fonds de Coopération Régionale de Guadeloupe) pour organiser un atelier régional sur la lutte contre les cercosporioses des bananiers dans les Caraïbes ;

- 2003-2004** : Coordinatrice du projet de recherches du Ministère d'outre-mer « Evaluation de l'efficacité de la résistance de nouvelles variétés de bananes pour le contrôle de la cercosporiose jaune en Guadeloupe »
- 2002-2005** : Responsable scientifique d'un projet de recherches du Ministère de l'Agriculture-CTPS « Gestion spatiale de nouvelles variétés de bananes résistantes aux cercosporioses dans les Antilles françaises »

### 3. Animation de réseaux

- Juillet 2016** : Nomination en tant que co-chair d'un groupe de travail sur les maladies du bananier au sein du CPHD (Caribbean Plant Health Director)
- Depuis 2013** : Membre du bureau du réseau EpiArch (Epidémiologie et Architecture animé par l'INRA)
- Depuis 2010** : Membre actif du comité de pilotage de la surveillance de la cercosporiose noire en Guadeloupe
- 2008-2010** : Animation avec acteurs professionnels (DAAF, FREDON, Profession bananier) pour construire un réseau d'épidémiosurveillance sur la cercosporiose noire des s en Guadeloupe et en Martinique
- 2006** : Initiative de mise en place d'un réseau caribéen sur les cercosporioses du bananier

### 4. Organisations d'atelier et de symposium (10)

- 05/2018** : Co-organisation avec l'Université des Antilles et l'INRA d'un **symposium national** sur «Modélisation statistique en écologie et biosciences », Pointe-à-Pitre, Université Guadeloupe (30 participants, 2 jours)
- 01/2018** : Co-organisation avec INRA-IRD d'un **séminaire scientifique** du projet E-SPACE « Improving epidemiosurveillance *E-SPACE* of Mediterranean and tropical plant diseases", Montpellier, France (40 personnes, 2 jours)
- 04/2017** : Co-organisation avec l'Université des Antilles et l'INRA d'un **symposium international** sur «Modélisation mathématique en écologie et en biosciences », Petit-Bourg, Guadeloupe (23 personnes, 1 jour) ;
- 10/2016** : Organisation d'un **séminaire** sur la santé des plantes du consortium du projet Feder-MALIN, Neufchateau, Guadeloupe (25 personnes, 1 jour)
- 11/2015** : Organisation de la **réunion de clôture** d'une extension du projet européen CABARé sur la durabilité de l'agriculture caribéenne, Jarry, Guadeloupe (80 personnes de 15 pays, 2j)
- 06/2015** : Organisation de la **réunion de clôture** du projet européen CABARé, Pointe-à-Pitre, Guadeloupe (70 personnes de 15 pays, 2j) ;
- 05/2015** : Co-organisation avec l'Université Antilles-Guyane d'un **symposium régional** sur « Risques et modèles en épidémiologie (santé humaine, animale et végétale), Pointe-à-Pitre, Guadeloupe (30 personnes, 2 jours)
- 06/2013** : Co-organisation avec la profession bananière (IT<sup>2</sup> et UGPBan) d'un **séminaire scientifique international** sur les cercosporioses et la production de banane durable au Gosier, Guadeloupe (90 personnes, 3 jours)
- 03/2013** : Organisation d'un **séminaire scientifique régional** sur le contrôle de la cercosporiose noire et la production de banane à La Havane, Cuba (50 personnes, 3 jours)
- 10/2006** : Organisation d'un **workshop régional** sur les « Risques liés à la cercosporiose noire dans les Caraïbes », Pointe-à-Pitre, Guadeloupe (35 personnes pendant une semaine)



## Evaluation de manuscrits et jury de thèse

1 à 2 articles/an pour des revues internationales (*Phytopathology, Tropical Plant Pathology, Tropical Plant Biology, Fruits*)

**2015** : Membre du jury (examineur) de la thèse de Teresa Reina Martinez , Univ. Des Antilles.

## Expertise scientifique et technique

Deux types d'expertise scientifique ont été réalisés essentiellement sur les cercosporioses du bananier. Il s'agit (i) d'expertise scientifique apportée (depuis 2012) à des réseaux de santé des plantes et financée à travers les projets de recherche et (ii) d'expertises techniques et contractualisées (avant 2012).

- **Expertise scientifique**

**Depuis 2019** : Référente scientifique pour le Cirad sur les réseaux d'épidémiosurveillance en santé des plantes et veille sanitaire

**Depuis 2017** : expert scientifique du groupe de travail sur les maladies des bananiers dans le réseau CPHD

**2011-2018** : Participation et suivi du comité d'experts sur la cercosporiose noire coordonné par les directions de l'agriculture et la forêt de Martinique et Guadeloupe.

**2006-2010** : Initiative et rôle moteur dans la mise en place de réseaux d'épidémiolo-surveillance vis-à-vis de la cercosporiose noire en Martinique et en Guadeloupe

**Depuis 2007** : Appui méthodologique et scientifique sur le phénotypage au champ des cercosporioses du bananier pour les généticiens du CIRAD

- **Expertise technique**

**1997-2010** : Réalisation d'expertises techniques contractualisées (70) pour les sociétés bananières et firmes phytosanitaires.

Six expertises ont été contractualisées de 1999 à 2010 par les professions bananières des Antilles françaises (LPG, Banamart), anglaises (Wibdeco), de Cote d'Ivoire (OCAB) et du Suriname et 63 expertises ont été réalisées au Cameroun de 1997 à 2001 dont la moitié concernait l'évaluation de nouveaux fongicides (contrats avec des firmes phytosanitaires) car le CRBP était le seul organisme national habilité par le Ministère de l'agriculture à réaliser des essais en vue d'une homologation des produits phytosanitaires sur bananiers au Cameroun. Les expertises ont porté sur 3 thèmes différents: diagnostic/prospections de la maladie en zones indemnes, monitoring de la résistance du pathogène aux fongicides et évaluation de fongicides.

**De 1999 à 2012** : Expertises sur le diagnostic de la cercosporiose noire et prospections de surveillance dans des pays indemnes Haïti (juin 1999), Suriname (septembre 2004), Antilles britanniques (2 semaines, novembre 2004, St Vincent : septembre 2008 et décembre 2009 ; Ste Lucie : janvier 2010 ; Dominique : octobre 2012), Antilles françaises (Martinique : septembre 2010 ; Guadeloupe : janvier 2012)

**De 1999 à 2010** : Expertises agronomiques en culture bananière (gestion raisonnée de la lutte chimique vis-à-vis des cercosporioses et monitoring de la résistance) en Côte d'Ivoire (1 semaine, avril

1999), au Suriname (3 semaines, septembre 2004), Antilles françaises (Martinique : 2006 ; Guadeloupe : 2008, 2010)

**De 1997 à 2001 :** Responsable au CRBP (Cameroun) des contrats d'expertise et d'études techniques avec les firmes phytosanitaires pour l'homologation de nouveaux fongicides contre les cercosporioses et avec les plantations privées (test de résistance aux fongicides) ; 63 rapports d'essai

La liste des documents produits sont présentés en Annexe 3.

## Synthèse des travaux

## Introduction générale

La consommation alimentaire mondiale est extrêmement dépendante des quatre principales denrées de base que sont le blé, le riz, le maïs et la pomme de terre, ainsi que d'autres produits comme la banane, le café et le cacao qui représentent des sources d'échanges et de revenus majeures pour les pays producteurs (Anderson *et al.* 2004). Les maladies infectieuses causées par des virus, des champignons ou des bactéries, qui affectent ces productions représentent des risques importants pour la sécurité alimentaire et justifient de nombreuses recherches appliquées et théoriques.

L'agriculture a favorisé à partir des années 70 l'homogénéité génétique des surfaces cultivées avec la culture d'une même variété de blé sur des très larges surfaces. Les cultures tropicales industrielles (telles que les bananiers pour l'exportation et le palmier à huile) ont suivi la même évolution. Les variétés du groupe Cavendish (la plus connue Grande naine) est cultivée sur plus de 50% de la surface à l'échelle mondiale.

Les écosystèmes des milieux tropicaux sont très diversifiés, très évolués mais sont mal connus. Compte-tenu des conditions climatiques, les maladies des cultures ont un impact très fort sur les productions (Ploetz, 2007). Les pressions parasitaires sont fortes et fréquentes (parfois permanentes pour certaines maladies) rendant difficiles leur contrôle. Ces difficultés sont encore plus grandes pour les cultures pérennes (présence du pathogène et de l'hôte en continu). Ainsi, la mise au point de méthodes de lutte contre des maladies des cultures pérennes tropicales est un véritable challenge.

Les méthodes de lutte sont donc devenues indispensables pour maintenir une production agricole. Elles consistent en une lutte intégrée combinant des méthodes culturales, chimiques et/ou génétique (cultures de variétés résistantes) qui sont fondées sur la perturbation du cycle infectieux. Il s'agit soit de ralentir le cycle épidémique, soit perturber certaines étapes (comme la reproduction du pathogène). La résistance quantitative répond fréquemment à ces deux objectifs. Bien que les mécanismes moléculaires de ce type de résistance ne sont pas encore élucidés (Corwin et Kliebenstein), la résistance quantitative est supposée être polygénique ce qui lui conférerait une plus grande durabilité.

Une épidémie se définit comme le développement et la propagation rapide d'une maladie contagieuse, le plus souvent d'origine infectieuse, dans une population. Ainsi, l'épidémiologie se définit comme une science qui étudie, au sein de populations (humaines, animales ou végétales), la fréquence et la répartition des problèmes de santé dans le temps et dans l'espace, ainsi que le rôle des facteurs qui les déterminent. La dynamique des populations s'intéresse à l'évolution quantitative d'une population (ensemble d'individus d'une même espèce) en intégrant différents processus (croissance, mortalité...). Elle permet de décrire le fonctionnement des populations, leur exploitation et de prévoir leur évolution pour mieux les gérer. En pathologie végétale, les hôtes étant fixés dans l'espace, c'est la dynamique des agents pathogènes qui est étudiée.

La compréhension de l'effet de la résistance quantitative sur la dynamique épidémique est importante pour concevoir des méthodes de lutte efficace et durable. En effet, en fonction de son utilisation, la résistance quantitative n'est pas toujours durable (Parleviet, 2002 ; Rimbaud *et al.*, 2018). Les cas de contournement de résistance quantitative ont été décrits assez récemment (Mundt, 2014) et une gestion spatiale de la résistance peut devenir efficace pour contrôler durablement les maladies comme c'est le cas des mélanges variétaux pour contrôler les rouilles des céréales (Mundt, 2002). Pour appréhender des systèmes complexes avec des échelles spatiales différentes, la modélisation est une démarche qui permet d'intégrer cette complexité. Cependant elle nécessite de bien comprendre les

dynamiques de populations en particulier l'identification de facteurs environnementaux et agronomiques qui jouent sur ces dynamiques.

La conception de méthodes de lutte efficaces et durables basées sur l'utilisation de variétés résistantes nécessitent donc une compréhension complète de l'interaction hôte-pathogène donc une approche multidisciplinaire : de génétique de la résistance variétale, de l'épidémiologie, de la dynamique et génétique de populations pathogènes, l'agronomie et de la modélisation.

C'est par une approche multidisciplinaire que j'ai tenté de concevoir des méthodes de contrôle efficace (basé sur de la résistance quantitative) contre des maladies fongiques de cultures pérennes tropicales, essentiellement sur la cercosporiose noire des bananiers qui est considérée comme une des 5 menaces biologiques pour la sécurité alimentaire (Pennisi, 2010) et une contrainte majeure pour la production de bananes pour l'export (Ploetz *et al.*, 2015).

# 1. Dynamique de maladie et effet des facteurs environnementaux

La compréhension des dynamiques de maladies végétales est primordiale pour développer de nouvelles méthodes de lutte ou optimiser les méthodes de lutte existantes. L'épidémiologie est définie par Madden *et al.* (2007) comme l'étude dans le temps et l'espace, du changement de l'intensité d'une maladie dans une population d'hôtes. L'identification des facteurs environnementaux responsables de ces changements permet de mieux comprendre les dynamiques épidémiques et dans certains cas d'identifier des leviers pour contrôler les maladies.

Je me suis intéressée à l'effet de facteurs environnementaux divers (tels que des facteurs édaphiques, culturaux et climatiques) sur les dynamiques de maladies de cultures pérennes tropicales (palmier à huile et bananier, plante annuelle, cultivée pendant 5-8 ans du fait de sa reproduction végétative par rejets). La nutrition des plantes dépend des facteurs édaphiques et culturaux (ex : fertilisation). Il est admis que la nutrition affecte la résistance des plants (capacité à limiter la pénétration, le développement et la reproduction du pathogène) et la tolérance des plantes aux maladies (habilité d'une plante à maintenir sa croissance ou son rendement malgré l'infection pathogène) (Dordas, 2008). Alors que les fonctions physiologiques de la nutrition des plantes sont bien connues, les interactions entre les nutriments et le système plante-pathogène ne sont pas encore bien comprises (Huber, in Dordas, 2008).

## 1.1 Identification de facteurs environnementaux influents

L'influence des facteurs environnementaux a été étudiée par des enquêtes épidémiologiques sur les maladies des bananiers : la cercosporiose noire, maladie foliaire la plus grave de cette culture (due à un champignon *Pseudocercospora fijiensis*, ascomycète dispersé par le vent et la pluie) et sur la maladie des nécroses fongiques racinaires dues à *Cylindrocladium* sp.

### **Facteurs édaphiques**

Les facteurs édaphiques englobent les propriétés chimiques, physiques et biologiques des sols.

Des observations faites par le Cirad aux Antilles avait montré que les nécroses racinaires des bananiers de type dessert étaient liés au champignon *Cylindrocladium*. Dans le cadre d'une mission d'expertise d'un collègue agronome du Cirad pour une plantation industrielles privée, une enquête épidémiologique a été réalisée (en prestation) au Cameroun sur 190 parcelles (90% en bananeraies industrielles, 10% en parcelles paysannes). L'incidence de *Cylindrocladium*, nulle en parcelles paysannes, a été mise en évidence en parcelle industrielle de bananes dessert (variété Cavendish) sans corrélation avec l'âge des parcelles et fortement corrélée ( $R^2 = -0.43$ ) avec le type de sol (incidence la plus élevée dans les andosols). Ces résultats peuvent s'expliquer par des différences de sensibilité variétale mais également de réceptivité des sols. Cependant la confidentialité des données n'a pas permis de valoriser les résultats sous forme de publication ni de poursuivre les travaux (car sans effet sur les plantains).

Concernant la cercosporiose noire des plantains, il a été observé également par enquêtes un effet du type de sol sur la sévérité de la maladie (% de surface nécrosée/bananier) au Cameroun (**Publication 4**), elle-même liée au rythme d'émission foliaire (lent sur sols ferrallitiques jaunes ce qui engendre une durée de vie plus longue des feuilles et de la maladie sur le bananier – qui a un nombre fixé de feuilles). En Guadeloupe, suite à l'invasion de la maladie, un suivi épidémiologique sur 12 parcelles pendant 5

ans (2014-2018) a été réalisé, par la FREDON (acteurs de la surveillance du territoire) en collaboration avec le Cirad (j'ai conçu les protocoles d'observation). Une 1<sup>ère</sup> analyse statistique des résultats suggère que le niveau de maladie est moins élevé dans les vertisols (Trousance *et al.* 2018). Un stage (Master 1) est planifié à partir de Mai 2019 pour réaliser des analyses statistiques multivariées afin d'étudier l'effet du type de sol et de certaines pratiques culturales.

### **Facteurs agronomiques**

Une enquête épidémiologique sur 25 parcelles/pays a été réalisée dans les Caraïbes (à Cuba et en République dominicaine) pour identifier des pratiques culturales liées la sévérité de la cercosporiose noire sur des bananiers hybrides et plantain sans suivi temporel. Parmi 8 variables relevées, le type d'irrigation, le mode de contrôle des adventices et le type de cultures avoisinantes sont les 3 variables qui expliquent le plus la sévérité de la maladie (**Publication PS3**). Cette enquête avait été réalisée à une seule date (1 date/banancier/parcelle). L'analyse du jeu de données temporelles de Guadeloupe devrait permettre d'avoir plus de puissance statistique et confirmer (ou pas) l'effet de ces pratiques.

### **Facteurs climatiques**

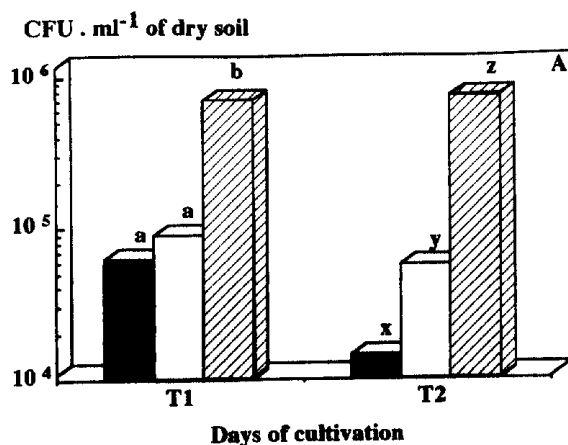
Les facteurs climatiques (particulièrement la pluie) sont importants dans la vitesse de développement de la maladie. Dans la même enquête sur la cercosporiose des bananiers dans les Caraïbes, une corrélation positive entre le cumul des pluies au cours des 5 mois précédant l'évaluation et le niveau de maladie a été calculée pour le plantain en République dominicaine mais pas à Cuba (**Publication PS3**).

Un ouvrage technique pour appuyer les agriculteurs du Cameroun dans leurs pratiques agronomiques pour la production de plantain a été récemment publié (**Ouvrage 4**).

## **1.2 Effet des pratiques culturales sur la sévérité de maladie**

Les enquêtes ont permis de mettre en évidence l'effet de certains facteurs environnementaux sur la sévérité de maladie foliaire et tellurique. Pour confirmer et quantifier ces effets, pour appuyer la conception de méthodes de lutte à l'échelle de la parcelle, j'ai évalué l'effet de pratiques culturales (itinéraires agronomiques) par une approche expérimentale. En effet les pratiques culturales sont des techniques décidées par les agriculteurs alors que le type de sol et le climat sont des facteurs agissant à une échelle spatiale supérieure à la parcelle et sont moins manipulables.

Dans le cas de la fusariose du palmier à huile, maladie vasculaire fongique (due à *Fusarium oxysporum* f.sp. *elaedis*), l'effet de pratiques culturales a été évalué vis-à-vis de la gravité de maladie et de la réceptivité des sols à la maladie. En effet, des taux de maladie élevés couplés avaient été observés sur des sols ayant des niveaux d'agents pathogènes faibles. Cette problématique avait fait l'objet de mon doctorat. L'effet de la culture de plante de couverture (*Pueraria javanica* et *Acacia mangium*) et l'apport de rafles sur la réceptivité des sols à la maladie ont été évalués en Côte d'Ivoire séparément, sur un sol de savane prélevé en parcelle (déposé dans des bacs). L'apport de rafles n'a pas modifié la réceptivité du sol à la maladie contrairement à la mise en culture du sol (en particulier avec le *Pueraria*) (**Publication P0**). J'ai pu démontrer que cette baisse de la réceptivité du sol à la maladie était corrélée à une augmentation de la densité des populations de *Fusarium oxysporum* sp. (Figure 1) sans changement de leur diversité génétique (**Publication P2**). Les densités élevées de populations de *Fusarium* spp et de *F.oxysporum* sp. ont pu rentrer en compétition avec l'agent pathogène expliquant la baisse de réceptivité du sol. Pour faciliter les caractérisations génotypiques futures, nous avons montré que la méthode des groupes de compatibilité végétative était liée et pouvait être considérée comme l'unité de populations (**Publication P1**).



**Figure 1** : Influence de la culture de *Pueraria javanica* sur les densités de populations de *Fusarium* spp. En sol nu (noir), cultivé (blanc) ou rhizosphérique (hachuré) après 49 (T1) et 230 jours (T2).

Concernant la cercosporiose noire des bananiers, dans des sols à forts taux de calcium, des corrélations négatives significatives ont été obtenues entre certains composants minéraux dans les feuilles et le sol et la sévérité de la maladie : à Cuba (pour l'azote du sol et le magnésium des feuilles) et en République dominicaine (Ph du sol et le magnésium) –données issues de l'enquête réalisée dans les Caraïbes. Une expérimentation a été mise en place à Cuba pour évaluer l'effet de 4 programmes de fertilisation sur le niveau de maladie et le rendement de 4 accessions de bananiers. Les résultats montrent des poids de régimes les plus élevés et des niveaux de maladie (% surface malade/banancier) les plus faibles pour les programmes les plus complets (apport de KCL complété avec Urée et Magnésium) (**Publication PS3**).

### 1.3 Enseignement pour le contrôle des maladies

Ces études ont permis d'identifier dans les Caraïbes et en particulier en Guadeloupe des zones climatiques et des types de sol les moins favorables à la cercosporiose noire des bananiers. Cela permettra de définir des zones pédoclimatiques défavorables et donc d'orienter (dans la mesure du possible) le choix des lieux de culture des bananiers. Des informations techniques ont été acquises suite aux expérimentations et montrent que la croissance de la plante (émission foliaire) est un facteur important pour le contrôle d'une maladie foliaire (telle que la cercosporiose noire) qui peut être atteinte sur des sols à fort taux de matière organique et/ou avec des programmes de fertilisation minérale complet. Dans le cas des maladies d'origine tellurique, des pratiques jouant sur les caractéristiques édaphiques du sol telle qu'une culture d'une légumineuse permettent de réduire la réceptivité du sol à la maladie, telle que la fusariose du palmier à huile.

**P0. Abadie C., de Franqueville H., Renard J.L., Alabouvette C. 1996. Influence de quelques techniques culturales sur la gravité de la fusariose du palmier à huile. *Plantations Recherche et Développement*, 3 (4), p259-271**

**P1. Steinberg C., Edel V., Gautheron N. Abadie C., Vallayes T., Alabouvette C. 1997. Phenotypic characterization of natural populations of *Fusarium oxysporum* in relation to genotypic characterization. *FEMS Microbiology Ecology*, 24, p73-85.**



- P2. **Abadie C.**, Edel V., Alabouvette C. **1998**. Soil suppressiveness to fusarium wilt : influence of a cover-plant on density and diversity of fusarium populations. *Soil Biology and Biochemistry*, 30 (5), p643-649.
- P4. Pierrot J., Achard R., Temple L., **Abadie C.**, Fogain R. **2002**. Déterminants de la production de plantains dans le sud-ouest du Cameroun : intérêt d'un observatoire. *Fruits* 57 (2), p75-86.
- Morales L., Rengifo D., Pérez Vicente L., Dávila Martínez A., Espinosa A., Folgueras Montiel M., Montero Y., Martínez E., Suárez P., Martínez T., Lescot T., **Abadie C.** 2016. Resistance efficacy of new bananas hybrids and impact of fertilization on Black Sigatoka severity. *Proceedings of the XXI<sup>th</sup> international meeting of ACORBAT*, 19-22/04/2016, Miami, USA.
- Trousance Y., Puech H., Merle T., Cely T., Diman C., Miath P., Lubin N., Chilin-Charles Y., Jacoby-Kaoly C., **Abadie C.** 2018. Exploitation des données d'épidémiosurveillance sur la cercosporiose noire sur plantain : outil privilégié pour raisonner la lutte à l'échelle du territoire guadeloupéen. Symposium « Modélisation et Statistiques en écologie et en Biosciences », 15-16/05/2018, Pointe-à-Pitre.
- PS3. Cavalier A., Perez Vicente L., Rengifo D., Minière L., Lescot T., **Abadie C.** Environmental factors affect the severity of black leaf streak disease on partially resistant banana hybrids. A soumettre à *Plant Pathology*.
- O4. Mouliom Pefoura M., **Abadie C.**, Kwa M. **2019**. Chapitre « Lutte contre les maladies des feuilles et des fruits ». In : *Le bananier plantain : Enjeux économiques, alimentaires et agronomiques ; QUAÉ editors (sous presse)*

## 2. Dynamique de maladie et qualité des fruits

Les cercosporioses sont des maladies à dégâts foliaires importants sur les variétés cultivées comme les bananes dessert de type Cavendish et les plantains, consommés par des millions de personnes comme aliment de base alimentaire. La cercosporiose noire des bananiers est considérée comme une des 5 menaces biologiques pour la sécurité alimentaire (Pennisi, 2010) et une contrainte majeure pour la production de bananes pour l'export (De Lapeyre *et al.*, 2010, Publication P10).

Pour appuyer la conception de méthodes de lutte, il a paru important d'évaluer l'effet de la maladie sur le rendement, en particulier la qualité des fruits et ce par type de systèmes de production. Nous nous sommes attachés à décrire (de façon quantitative) le lien entre la dynamique de la maladie et la qualité des fruits produits.

Nous définissons ici la qualité des fruits de façon globale, en considérant ses composantes pomologiques (taille, poids et couleur du fruit) et sa durée de vie verte (DVV). En effet, il était connu (Guzman *et al.*, 2018, Ouvrage 2) que les cercosporioses engendraient une maturité plus précoce des fruits de type dessert (diminution de leur durée de vie verte par conséquent impactant leur durée de vie commerciale). Cependant le type de relation et la nature de ce lien n'étaient pas connus.

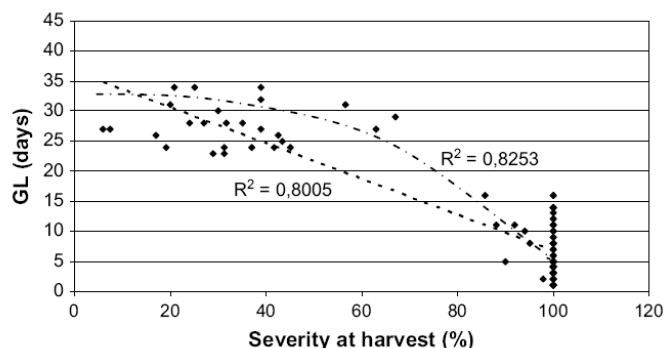
### 2.1 Liens entre dynamique de maladie et qualité des fruits dessert (Cavendish)

Des études ont été menées entre 2007 et 2009 en collaboration avec M. Chillet (CIRAD, UMR Qualisud) sur la cercosporiose jaune et a fait l'objet d'un encadrement technique d'une doctorante brésilienne dirigée par M. Chillet. Deux expérimentations ont été mises en place en conditions naturelles d'infestation en Guadeloupe et ont permis de suivre la dynamique de maladie au cours d'un

cycle de culture et la qualité des fruits des bananiers dessert, dans un système de production export (monoculture, apport d'intrants).

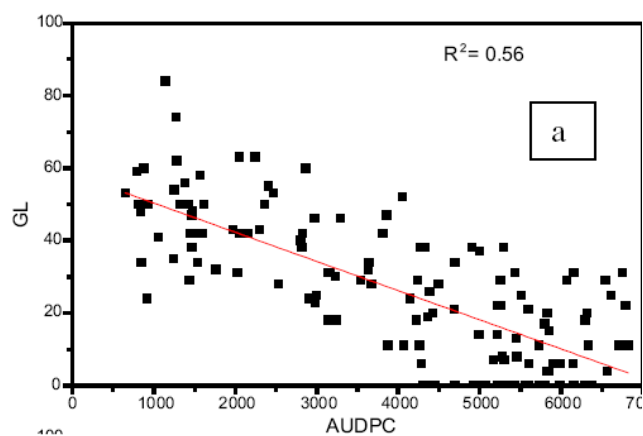
### **Relation entre maladie et qualité**

Ces études nous ont permis d'établir l'existence d'une relation directe et négative entre le niveau de sévérité (en % de surface nécrosée/plant) et la DVV (Figure 2) et ce contrairement à des stress abiotiques qui n'ont pas d'effet connu direct sur la DVV des fruits (**Publication 8**).



**Figure 2:** Relation entre la sévérité de la cercosporiose jaune et la durée de vie verte des fruits de Cavendish récoltés à 900°C.jour en Guadeloupe

De plus, nous avons montré une corrélation forte entre la quantité de nécroses accumulées sur la plante entre la floraison et la récolte et la DVV (Figure 3 ; **Publication 14**). En effet, le bananier n'émettant plus de feuilles après la floraison, la quantité de nécroses sur le plant augmente nécessairement entre la floraison et la récolte. En cas de forte infestation, les bananiers n'ont plus de feuille à la récolte. Nous avons pu également montré que la maladie avait un effet sur la couleur de la pulpe du fruit et engendrait une diminution du poids des fruits (mais non leur diamètre) (**Publication 16**).



**Figure 3 :** Effet du niveau de sévérité de la cercosporiose noire (exprimé en AUDPC du % de surface nécrosée/plant entre la floraison et la récolte) et la DVV sur des fruits, récoltés à 900°C.J

### **Mise en évidence d'un signal foliaire**

Nous avons pu montrer que la présence de nécroses sur les plants le mois précédant la récolte perturbent la maturation des fruits. En effet, en ayant procédé à une élimination de toutes les nécroses

présentes sur les bananiers un mois avant la récolte, le pourcentage de fruits mûrs sur la parcelle est passé de 55% à 0% et la DVV de 45 à 7 jours (**Publication 16**). Ces résultats suggèrent que la présence de nécroses modifie la physiologie des fruits à un moment précis (1 mois avant la récolte) et sur une durée assez courte (par rapport au cycle de 9-10 mois) et cela pourrait s'expliquer par une production de toxines produite par le champignon. Il a été mis en évidence que la juglone et 2,4,8 trihydroxytetralone sont des métabolites secondaires secrétées de façon importante pendant l'interaction hôte-pathogène (Guzman *et al.*, 2018, Ouvrage 2). Les mécanismes liés à cette perturbation de la maturité des fruits sont inconnus et nécessiteraient des études plus approfondies de physiopathologie qui devraient être poursuivies par l'UMR Qualisud.

## 2.2 Liens entre dynamique de maladie et qualité des fruits à cuire (Plantain)

Pour les productions de bananes à cuire d'autoconsommation, les usages sont différents : les fruits pouvant être consommés vert ou mûrs et la vente est souvent basée sur le nombre de fruit et/ou le poids des fruits.

Dans une expérimentation menée au Cameroun en conditions naturelles d'infestation, nous avons montré un effet significatif de la maladie sur le poids du régime des plantains (en second cycle), qui s'explique par un nombre de mains et de doigts plus faibles sur les plantains témoins (sans fongicides) (**Publication PSCL4**). Nous avons observé un raccourcissement de durée entre la floraison et la récolte suggérant une accélération de la maturité des fruits comme dans le cas de la banane dessert. Il est prévu de confirmer et préciser les liens entre la dynamique de maladie et la qualité des plantains dans un projet de développement d'appui à la production de plantains en Guadeloupe (projet RITA).

## 2.3 Enseignement pour l'amélioration génétique

Ces études ont précisé l'impact de la maladie sur les productions bananières. Dans le cas des productions pour l'export, nous avons pu montrer qu'une sévérité (% de surface nécrosée/plant) de 20% pendant la phase végétative et une élimination des feuilles avant la récolte permettaient d'éviter une réduction de la DVV des fruits récoltés. Ces résultats suggèrent qu'il est possible de maintenir une production pour l'exportation avec des bananiers ayant un certain niveau de maladie. En terme de lutte chimique, l'objectif classique de contrôle des cercosporioses du bananier est une sévérité (nécroses) nulle. Cette connaissance pourrait permettre de modifier ce seuil (en traitant moins souvent). Pour l'amélioration génétique, cela permet de définir des critères de sélection moins sévère pour la résistance à la maladie et sélectionner des hybrides de niveau de résistance partielle moyen.

PSCL4. Cohan JP., **Abadie C.**, Tomekpe K., Tchango Tchango J. 2003. *Evaluation des performances agronomiques et de résistance à la maladie des raies noires de l'hybride de plantain CRBP 39 du CARBAP. Résultats du 1<sup>er</sup> cycle de culture ; Infomusa 12 (1) : 29-32.*

P8. Chillet M., **Abadie, C.**, Hubert, O., Chilin-Charles, Y., de Lapeyre de Bellaire L. 2009. *Sigatoka disease reduces the greenlife of bananas ; Crop Protection 28 :41-45.*

P10. De Lapeyre de Bellaire L.; Fouré E., **Abadie C.**, Carlier J. 2010. *Black leaf streak disease is challenging the banana industry. Fruits, 65 (6): 327-342.*

P14. Castelan FP., **Abadie C.**, Hubert O., Chilin- Charles Y., de Lapeyre de Bellaire L., Chillet M. 2013. *Relation between the severity of Sigatoka Disease on banana quality characterized by pomological traits and fruits green life. Crop Protection 50 : 61-65.*

- P15. Chillet M., Castelan, FP., Abadie C., Huber, O., de Lapeyre de Bellaire L. 2013. Necrotic leaves removal: a key component of integrated management of *Mycosphaerella* leaf spot diseases to improve the quality of bananas : the case of Sigatoka disease. **Fruits** 68 (4) : 271-277.
- P16. Chillet M., Castelan FP., **Abadie C.**, Hubert O., Chilin- Charles Y., de Lapeyre de Bellaire L. 2014. Effect of Different Levels of Severity of Sigatoka Disease on Banana Pulp Color and Early Ripening. **Canadian Journal of Plant Pathology**, 36 (1) : 48-53.

### 3. Dynamique de populations pathogènes et résistance quantitative

Les maladies sont des contraintes importantes des cultures et d'autant plus fortes que les systèmes de production sont peu diversifiés. La résistance des plantes aux maladies permet de contrôler le niveau de maladie en réduisant l'utilisation de pesticides.

La résistance des plantes peut être définie dans un système à 2 variables : l'hôte et le pathogène. Vanderplank (1984) décompose la résistance en 2 formes : la résistance verticale et la résistance horizontale (qui peuvent coexister) correspondant en terme biométrique : pour la résistance horizontale au principal effet de variation de l'hôte (sur des traits quantifiables) et pour la résistance verticale à un effet différentiel dû à l'interaction entre variété et isolats. Coté pathogène, l'effet principal entre isolats correspond à l'agressivité et l'effet différentiel à la virulence. La résistance quantitative permet l'infection mais réduit le taux d'infection et le taux de reproduction du pathogène sur l'hôte. Si le déterminisme génétique de la résistance qualitative aux maladies repose sur peu de gènes à fort effet dont les traductions moléculaires commencent à être connus, le support génétique de la résistance quantitative aux maladies est encore peu décrit mais suppose d'impliquer beaucoup de gènes à faible effet (Corwin et Kliebenstein, 2017). De ce fait, la résistance quantitative est supposée être une résistance durable (Parlevliet, 2002).

Ainsi, existant à l'état sauvage dans les plantes, ces résistances sont exploitées à travers les programmes d'amélioration génétique des plantes cultivées grâce à une bonne connaissance du phénotype des géniteurs et des schémas de sélection assistés ou pas avec des marqueurs moléculaires.

Le Cirad a initié un programme d'amélioration génétique du bananier dès les années 1990 dont le 1<sup>er</sup> critère d'amélioration était la résistance à la cercosporiose noire du bananier (en Guadeloupe) et du plantain (au Cameroun). Fouré (in Guzman *et al.* 2018) a montré l'existence des deux types de résistance qualitative (ou totale) et quantitative (ou partielle). Les premiers travaux sur la génétique des populations pathogènes responsables de la cercosporiose noire, réalisés par le Cirad, ont montré des niveaux élevés de diversité génétique au sein des populations et de différenciation génétique entre populations ( $F_{st}$  : 0.32) (Carlier *et al.*, 1996). Les travaux de thèse d'A.Elhadrami ont montré l'existence d'une variabilité du pouvoir pathogène non liée à la diversité génétique (El Hadrami, 2000). Ces résultats suggèrent un potentiel évolutif important chez ce pathogène révélé par l'apparition rapide de souches résistantes à certains fongicides (exemple 2 ans pour les strobilurines) (Guzman *et al.*, 2018). Ainsi, le Cirad a choisi d'utiliser la résistance quantitative dans son programme d'amélioration génétique des bananiers pour une plus grande durabilité de la résistance variétale. Grâce à une connaissance précise de la diversité génétique du bananier (Perrier *et al.*, 2011) et malgré des faibles taux de fertilité, l'amélioration consiste pour le plantain à croiser des cultivars naturels triploïdes par des géniteurs diploïdes (eux-même améliorés ou pas) et pour la banane dessert à croiser des diploïdes doublés à la colchicine avec d'autres diploïdes (Bakry *et al.*, 2009).

Mes travaux ont porté sur l'étude de la résistance quantitative des bananiers et des plantains à la cercosporiose noire en particulier l'étude de son efficacité, sa caractérisation et sa durabilité.

### 3.1 Efficacité de la résistance quantitative

L'efficacité de la résistance d'une gamme de bananier mesurée par le niveau de maladie a été évaluée en conditions naturelles d'infestation sur des parcelles expérimentales au Cameroun soit sur des cultivars exotiques (existant dans les collections du CARBAP ou du CIRAD) soit sur des hybrides créés. Vingt à 200 plants ont été plantés par accession et le niveau de maladie a été évalué 1 à 3 fois/trimestre pendant 2 cycles de culture (environ 2 ans).

Au Cameroun, afin d'appuyer la diversification de la culture bananière très orientée sur le plantain, une évaluation de 20 accessions naturelles a montré que la moitié présente des niveaux de résistance partielle élevée et de bonnes performances agronomiques (**Publication 3**) ce qui a permis de proposer une liste de variétés performantes aux agriculteurs. Nous avons également évalué les performances de résistance et de production de plusieurs hybrides élites au Cameroun pour un hybride de plantain (CRBP39) et sur 2 hybrides de bananiers dessert (CIRAD 926 et CIRAD 918) vis-à-vis de la cercosporiose jaune en Guadeloupe (dans le cadre de 2 projets MOM et CTPS que je coordonnais) et vis-à-vis de la cercosporiose noire à Cuba et en République dominicaine (dans le cadre du projet CaBaRé que je coordonnais). Alors que les incidences de maladie sont maximales (100% de plants malades), les suivis de la maladie (% surface nécrosée/plant) ont montré des niveaux inférieurs à 1% contre 30% pour le plantain naturel (sensible à la maladie) et 12% pour le plantain traité aux fongicides (**PSCL4**) et de 0 à 20% pour les hybrides dessert respectivement vis-à-vis des cercosporiose jaune et noire.

*P3. Noupadja P., Tchango Tchango J., Abadie C., Tomekpe K. 2001. Evaluation de cultivars exotiques de bananiers au Cameroun ; Cahiers de l'Agriculture, 10, p19-24.*

*PSCL4. Cohan JP., Abadie C., Tomekpe K, Tchango Tchango J. 2003. Evaluation des performances agronomiques et de résistance à la maladie des raies noires de l'hybride de plantain CRBP 39 du CARBAP. Infomusa 12 (1) p29-32.*

### 3.2 Caractérisation de la résistance quantitative

Afin d'appuyer les programmes d'amélioration génétique du Cirad ou internationaux (FHIA en Honduras, EMBRAPA au Brésil, IITA au Nigéria) pour le pilotage des croisements (choix des géniteurs) ou des études sur le déterminisme génétique de la résistance, une étape préalable est de bien caractériser la résistance quantitative. Ainsi, je me suis attachée à décrire ses composantes dans différentes conditions. Ces études faisaient suite à la thèse d'A. El Hadrami en cours dans l'équipe quand j'ai été recrutée mais qui n'a pas publié ses travaux (pour raisons personnelles). La variété de référence sensible est la variété commercialisée dans toutes les plantations industrielles (Grande naine du groupe Cavendish).

#### **Méthodes de caractérisation des composantes de résistance**

Une méthode d'inoculation sur fragments de feuilles maintenus en survie a été mise au point pendant la thèse d'A.Elhadrami et finalisée (**Publication 7, Publication PSCL5**). Elle consiste à pulvériser une suspension de conidies (produites in vitro) sur des fragments de 25 cm<sup>2</sup> prélevés sur des bananiers

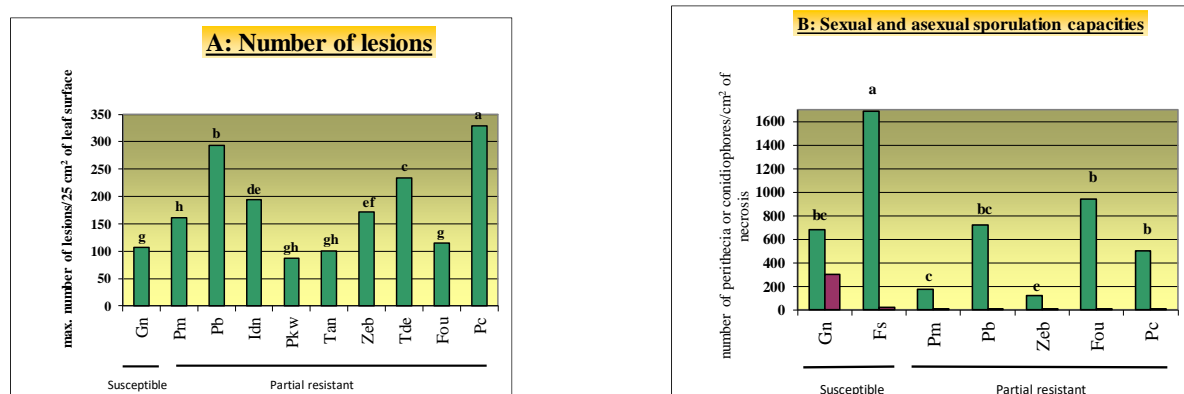
cultivés en serre et âgés de 3 à 5 mois. Sur une gamme de 8 accessions diploïdes évalués en conditions contrôlées (fragments) inoculés) et naturelles (au Cameroun), nous avons montré une concordance satisfaisante des résultats entre les deux méthodes (El Hadrami, 2000). Cependant, comme le champignon est hétérothallique (2 souches de type sexuel opposé sont nécessaires à la reproduction sexuée) et que la reproduction sexuée n'est pas encore maîtrisée en laboratoire, la capacité de sporulations sexuée ne peut être mesurée avec la méthode sur fragment de feuilles. Une méthode d'évaluation des composantes de résistance a été élaborée en observant par bananier les rangs de feuille présentant des stades de lésions différents (de stade 1 : apparition des 1ères lésions au stade 6 correspondant aux nécroses, Guzman, *et al.* 2018). Le couplage des évaluations in vitro et au champ permet de mesurer précisément chacune des étapes du cycle infectieux. Ces méthodes ont été récemment publiées dans un ouvrage technique (**Ouvrage O3**).

### Caractérisation des composantes de résistance

Les résistances (qualitative ou quantitative) perturbent le cycle infectieux des pathogènes. Ainsi, la caractérisation des composantes de résistance revient à mesurer (quantitativement) les différents paramètres du cycle infectieux et ce pour chaque variété.

Le cycle de vie de *P.fijiensis*, agent de la cercosporiose noire, était bien décrit (Fouré, in Guzman *et al.* 2018) mais les valeurs des paramètres du cycle l'étaient beaucoup moins car soit non mesurables au champ (comme l'efficacité d'infection) et/ou soit très variables (car indirectement liées aux conditions climatiques comme les densités d'inoculum et la vitesse de croissance des lésions).

Sur des accessions diploïdes évaluées à la fois en laboratoire et au Cameroun connues pour des niveaux de résistance similaires (mesuré à l'aide de la plus jeune feuille nécrosée variant de 9 à 11), des différences significatives ont été mesurées entre accessions pour plusieurs étapes du cycle infectieux telle que l'efficacité d'infection (approximée par le nombre de lésions apparues après inoculation) et les capacités de sporulations asexuées et sexuées (Figure 4) (**Poster Po5**). L'efficacité d'infection et la sporulation sexuée varient entre accessions alors que la sporulation asexuée est très peu variable. Pisang berlin (Pb) et Pisang madu (Pm) sont deux accessions qui présentent des niveaux contrastés de nombre de lésions et de capacité de sporulation sexuée (les autres variables sont similaires). Il est intéressant de noter que le nombre de lésions sur certaines accessions résistantes peuvent être supérieures (mais surface des lésions plus petites) à celle sur la variété sensible.



**Figure 4:** Evaluation en conditions contrôlées (A) et naturelles (B) du nombre de lésions maximum apparues après inoculation d'un fragment foliaire de 25 cm² et du nombre de conidiophores (violet) et périthèces (vert) / cm² de nécroses naturelles sur une même gamme de cinq accessions. Les lettres différentes représentent des différences significatives au seuil de 5%.

Ces résultats mettent en évidence que la résistance quantitative joue sur chacune des 8 étapes du cycle infectieux (nombre de lésions/efficacité d'infection ; durée d'incubation ; surface et croissance des lésions ; latences asexuée et sexuée ; capacités de sporulations asexuée et sexuée) et qu'elle se décompose donc en 8 composantes. Nous avons montré que ces composantes de résistance agissent au début du cycle infectieux (moindre efficacité d'infection), à l'apparition des symptômes (durée d'incubation longue) et lors du développement des lésions (vitesse de croissance des lésions lente), lui-même jouant directement sur les latences conidiennes et ascospores.

Avec la même démarche, j'ai également caractérisé les composantes de résistance de 3 hybrides de bananiers dessert (Cirad 916, Cirad 918, Cirad 925) évalués en Guadeloupe (pour la cercosporiose jaune avant 2009 et pour la cercosporiose noire à partir de 2014) et à Cuba. Les études montrent que la vitesse de croissance des lésions est la principale composante de résistance de ces hybrides (**Publication PSCL 8, Posters Po5 et Po13**).

Enfin, j'ai participé au Cameroun à une évaluation mondiale d'une gamme de cultivars ou d'hybrides (12) pour leurs performances agronomiques et de résistance (IMTP3 : International Musa Testing Program 3), étude coordonnée par Bioversity (ex INIBAP) de 1999 à 2001 (2 cycles de culture). Cela avait fait l'objet d'un rapport technique.

### ***Appui aux études génétiques de la résistance quantitative***

Compte-tenu de l'expertise développée sur la caractérisation de la résistance quantitative et de la proximité des généticiens sur les stations expérimentales du Cameroun et en Guadeloupe, j'ai apporté un appui à l'évaluation et la sélection d'hybrides résistants à la cercosporiose jaune et noire en Guadeloupe et au Cameroun. En effet pendant mon affectation en Guadeloupe, la cercosporiose noire était absente jusqu'en 2012 donc les évaluations au champ étaient réalisées vis-à-vis de la cercosporiose jaune.

#### **• Sources de résistance**

En Guadeloupe, compte-tenu de mon expertise acquise au Cameroun, j'ai caractérisé (en 2007) la résistance à la cercosporiose jaune de 23 accessions (géniteurs potentiels pour le Cirad) sous forme diploïde et tétraploïde montrant que le niveau de ploïdie n'a pas modifié le niveau de résistance. Les données ont été intégrées à la base de données des généticiens du Cirad et n'a pas fait l'objet de publication.

#### **• Génétique de la résistance par Approche par QTL :**

Dans le cadre de 2 projets internationaux (Banque mondiale et européen INCO) auxquels j'ai participé, j'ai réalisé le phénotypage pour la résistance au champ (en 1997 et 1998, au Cameroun) et en laboratoire (en 2003, à Montpellier) d'une population ségrégeante (F2) issue de l'autofécondation d'un hybride partiellement résistant issu d'un croisement (CAM) entre deux accessions diploïdes : sensible (Madang) et résistante totale (Calcutta 4). Le génotypage a été réalisée par F.Carreel, généticienne moléculaire du Cirad. Les résultats suggèrent que la résistance partielle est dominante sur la résistance totale et qu'elle serait expliquée par un QTL majeur et 2 QTL mineurs (**Publication PSCL1 et Poster Po2**). Des problèmes dans la cartographie n'ont malheureusement pas permis de valoriser sous forme de publication cette étude.

## • Génétique de la résistance par approche GWAS

En Guadeloupe, j'ai participé (élaboration de protocoles, encadrement des techniciens, analyses des données) à l'évaluation quantitative de la résistance de géniteurs et d'hybrides (300 à 500/an) pendant 8 ans (de 2010 à 2012 vis-à-vis de la cercosporiose jaune et depuis 2014 vis-à-vis de la cercosporiose noire). Cinq composantes de résistance partielle ont été mesurées au champ (sauf nombre de lésions, capacités de sporulations). Ces suivis constituent un jeu de données important et précieux à analyser par les collègues généticiens. Les premières analyses statistiques (en GLM) suggèrent des taux d'hérédité élevé de 0.42 à 0.45 pour 2 composantes de résistance.

Le génotypage de plusieurs centaines d'individus est en cours afin de tenter d'identifier par l'approche GWAS des zones du génome des bananiers liées à la résistance. Ces travaux devaient faire l'objet d'une publication future.

## • Identification de gènes de résistance

En collaboration avec une équipe brésilienne, j'ai participé à une étude de constitution d'une banque de séquences d'ADN ciblées et marquées (expressed sequence tag) en fournissant le matériel biologique (fragments de feuilles inoculées et prélevées très tôt après infection entre 4 et 14j pour le bananier résistant) à partir duquel les extractions d'ARN ont été réalisées puis transcrites en ADN. Cette étude a permis de générer environ 4000 séquences majoritairement liées à des fonctions métaboliques et de traduction génétique (**Publication 13**) qui ont été mises à disposition de la communauté internationale. Le Cirad n'a pas exploité ses séquences pour son programme car elles ont été construites à partir d'une accession de résistance qualitative (Calcutta 4).

Po2. **Abadie C.**, Carreel F., Tomekpe K., Carlier J., Fouré E., Escalant JV, Bakry F. 1998. Genetic determinism and inheritance of resistances against black leaf streak (*Mycosphaerella fijiensis*) in bananas ; In 7<sup>th</sup> International Conference of Plant Pathology, Edinburgh, Ecosse, 9-16/8/98, volume 3, n° 3.4.37 (poster)

PSCL1. Carreel F., **Abadie C.**, Carlier J., Tomekpé K., Lagoda P., Bakry F. 1999. Cartographie du génome et analyse génétique de la résistance à la maladie des raies noires chez les bananiers. **Infomusa**, 8 (1):

Po5. **Abadie C.**, El Hadrami A., Pignolet L., Nguidjo O., Zapater MF., Carlier J. 2003. Resistance to black leaf streak disease of banana : studies on efficiency and durability of partial resistance ; 8<sup>th</sup> International Congress of Plant Pathology, Christchurch, Nouvelle-Zélande, 2-7/02/03, p 353

PSCL5. **Abadie C.**, Pignolet L., Elhadrami A., Habas R., Zapater M.F., Carlier C. 2005. Inoculation avec *Mycosphaerella* sp., agent de cercosporioses, de fragments de feuilles de bananiers maintenus en survie. **Cahier des Techniques de l'INRA** ; Numéro spécial « Méthodes d'appréciation du comportement variétal vis-à-vis des bioagresseurs », p131-134.

P7. **Abadie C.**, Zapater MF, Pignolet L. Carlier J., Mourichon X. 2008. Artificial inoculation on plants and banana leaf pieces with *Mycosphaerella* spp. responsible to Sigatoka leaf spot diseases ; **Fruits** 63 (5) p319-323.

PSCL8. **Abadie C.**, Chilin-Charles Y., Huat J., Salmon F., Pignolet L., Carlier J., Lescot T., Côte F., Jenny C. 2009. New approaches to select cultivars of banana with durable resistance to *Mycosphaerella* leaf spot diseases. **Acta Horticulturae** 828:171-178.

P13. Passos M., de Oliveira Cruz V, Emediato FL, de Camargo Teixeira C, Souza MT Jr, Matsumoto T, Renno' Azevedo VC, Ferrei ra CF, Amorim EP, de Alencar Figueiredo LF, Martins NF, de Jesus Barbosa Cavalcante M, Baurens F-C, da Silva OB Jr, Pappas GJ Jr, Pignolet L, **Abadie C**, Ciampi AY, Piffanelli P, Miller RNG. 2012. Development of expressed sequence tag and expressed sequence tag-simple sequence repeat marker resources for *Musa acuminata*. **AoB PLANTS** 2012 (pls030) : 20 p.; DOI :10.1093/aobpla/pls030



- Po13. Morales L., Rengifo D., Pérez Vicente L., Dávila Martínez A., Espinosa A., Folgueras Montiel M., Montero Y., Martínez de la Parte E., Suárez P., Martínez T., Lescot T., **Abadie C.** 2016. Resistance efficacy of new bananas hybrids and impact of fertilization on Black Sigatoka severity. *Proceedings of the XXI<sup>th</sup> international meeting of ACORBAT, 19-22/04/2016, Miami, USA.*
- O3. Carreel F. and Perez-Vicente L., Roussel V., Carlier J., **Abadie C.** 2019. Guidelines protocols for the evaluation of resistance to *Pseudocercospora* leaf spot diseases of banana. Bioversity editor (sous presse)

### 3.3 Efficacité des composantes de résistance

Après avoir mis en évidence l'existence de différentes composantes de résistance à la cercosporiose noire, il a paru important d'évaluer le poids épidémiologique de chaque composante. J'ai suivi deux approches successivement

#### **Approche expérimentale**

J'ai évalué l'effet de 2 composantes de résistance (efficacité d'infection et sporulation sexuée) identifiées dans 2 accessions différentes (cf paragraphe 3.2) Pisang madu et Pisang berlin. Des parcelles de 160 bananiers ont été plantées au Cameroun en conditions naturelles d'infestation et la sévérité de maladie /bananier a été suivie pendant 4 cycles de cultures.

Severity index* (%) during a cropping cycle				
	1st cycle	2d cycle	3d cycle	4d cycle
Grande naine (S)	37.5 a	39 a	36 a	40a
<i>P.berlin</i> (R)	22.7 b	18.6 b	17.2 b	18b
<i>P.madu</i> (R)	17.5 c	7.1 c	0.8 c	<0.1c

**Figure 5:** Indice de sévérité (% de surface nécrosée/bananier estimée visuellement) moyen sur 4 cycles de culture et 2 accessions partiellement résistantes et un cultivar sensible à la cercosporiose noire (Grande naine)

Alors que le niveau de maladie est resté stable au cours des cycles de culture pour Grande naine et Pisang berlin, le niveau a diminué progressivement pour devenir quasi nul à partir du 3<sup>ème</sup> cycle (Figure 5). Ces résultats suggèrent que l'efficacité d'infection et la capacité de sporulation sexuée ont un fort poids épidémiologiques (**Poster Po5**). Bien que cette approche soit informative, elle reste restreinte aux accessions étudiées et aux conditions locales d'expérimentation et ne permet donc pas d'évaluer l'effet individuel de chaque composante de résistance.

#### **Approche de modélisation**

La modélisation a pris une place de plus en plus importante dans les études épidémiologiques depuis les années 2000. Elle permet notamment de synthétiser les processus en jeu et de simuler différents scénarios de contrôle d'une maladie.

Le développement d'un modèle épidémiologique de la cercosporiose a fait l'objet d'une partie de la thèse de Clara Landry que j'ai coencadré avec F.Bonnot. Aucun modèle n'existait dans la littérature sur les cercosporioses des bananiers. Ainsi, nous avons développé un modèle mécaniste de l'interaction hôte/pathogène à l'échelle d'une plante pour mieux comprendre la dynamique épidémique et évaluer l'efficacité des différentes composantes de résistance. Le modèle couple un module de croissance du bananier (de la plantation à la récolte avec 20 paramètres) et un modèle épidémique décomposé en 4

étapes du cycle infectieux (infection, croissance des lésions, sporulations, dispersion verticales des spores) comme présenté dans la figure ci-dessous :

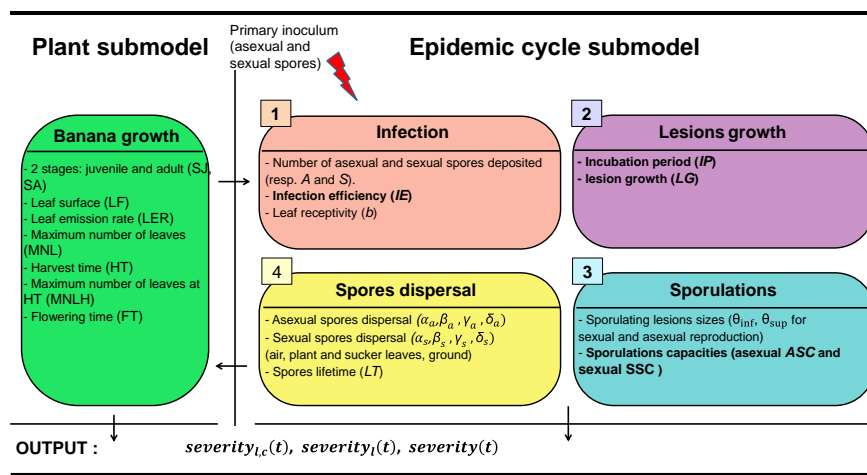
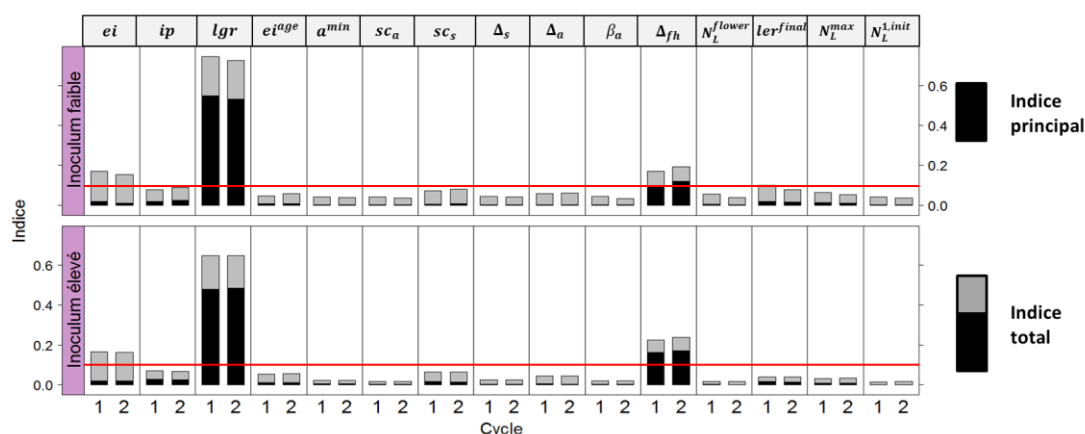


Figure 2. Overview of the banana/M.fijiensis model and the articulation of different submodels

Pour paramétrer le modèle, une expérimentation a été mise en place sur plantain en République dominicaine (dans le cadre du projet Cabaré que je coordonnais) qui a permis d'acquérir un jeu de données temporelles (3 mois) de l'apparition des lésions à la mort de la feuille. Ces données nous ont permis d'estimer par une approche bayésienne (MCMC) certains paramètres du modèle. Le modèle a été validé sur un jeu de données indépendant (RMSE de 6.2%). L'efficacité d'infection a été estimée à 0.0167 ce qui signifie qu'il faut 60 spores pour créer une lésion. Les distributions à postériori ont permis d'acquérir une meilleure connaissance de ces paramètres (**Publication P18**). Les simulations ont permis de confirmer l'impact fort du rythme d'émission foliaire (déjà mesuré avec les enquêtes), d'évaluer le fort effet d'une période d'incubation longue ou d'une efficacité d'infection faible et le faible effet de la dispersion verticale et des capacités de sporulation asexuée et sexuée. L'exploration du modèle va être poursuivie pour mieux comprendre la dynamique des lésions et des spores.

L'analyse de sensibilité globale du modèle (méthode e-Fast) réalisée sous 2 pressions d'inoculum initial a permis de mettre en évidence 3 paramètres épidémiologiques (durée d'incubation, efficacité d'infection, vitesse de croissance des lésions) et 2 paramètres de croissance de la plante (rythme d'émission foliaire et durée entre floraison récolte), Figure 6.



**Figure 6** : Indice de Sobol pour 16 paramètres du modèle calculé pour 2 cycles de cultures et 2 pressions d'inoculum

Il est prévu de valoriser cette étude par une publication.

### **Enseignement pour le programme d'amélioration génétique**

L'analyse de sensibilité du modèle de simulation a permis de mettre en évidence que la durée entre la floraison et la récolte est un paramètre influent sur le niveau de maladie. Ce résultat a été partagé avec les généticiens et pourrait être ajouté aux critères de sélection pour la résistance des hybrides à la maladie.

Dans le schéma de sélection des nouveaux hybrides, des évaluations in vitro sont réalisées pour caractériser la résistance à la maladie des hybrides élités. Ces évaluations permettent de mesurer les 3 paramètres épidémiologiques les plus influents ce qui permet de les utiliser en paramètres d'entrée du modèle et ainsi pouvoir prédire le niveau de maladie par simulation. Comme le modèle est codé sous C avec des sorties sous R, son utilisation n'est pas facile. Ainsi, le modèle a été informatisé (par un prestataire, dans le cadre du projet Plan Banane Durable) afin d'en faire un outil (logiciel maison) simple d'utilisation pour les généticiens. Le transfert est prévu en 2019 et des données de croissance de bananiers ont été acquises par les généticiens pour adapter l'outil à la plateforme de sélection de nouvelles variétés de bananes dessert. Ce logiciel maison devrait être fonctionnel en 2019.

Po5. **Abadie C.**, El Hadrami A., Pignolet L., Nguidjo O., Zapater MF., Carlier J. 2003. *Resistance to black leaf streak disease of banana : studies on efficiency and durability of partial resistance ; 8<sup>th</sup> International Congress of Plant Pathology, Christchurch, Nouvelle-Zélande, 2-7/02/03, p 353*

P18. Landry C., Bonnot F., Ravigné V., Carlier J., Rengifo D., Vaillant J., **Abadie C.** 2017. *A foliar disease simulation model to assist the design of new control methods against Black Leaf Streak disease of banana. Ecological Modelling 359, p383-397*

### **3.4 Durabilité de la résistance quantitative**

Bien que la résistance quantitative est supposée durable (du fait de son support polygénique), des contournements de résistance ont été récemment démontrés, la plupart sur des cultures pérennes telle que la vigne (vis-à-vis du mildiou), du pommier (vis-à-vis de la tavelure) et de la canneberge (vis-à-vis de l'oïdium) mais également sur cultures annuelles telles que le poivron (vis-à-vis d'un virus), l'orge (vis-à-vis de l'oïdium) ou la pomme de terre (vis-à-vis du mildiou) (Mundt, 2014). En effet, la culture d'une même plante sur plusieurs années provoque une forte (longue) pression de sélection sur les pathogènes.

Des observations à Cuba mentionnaient des niveaux élevés de cercosporiose noire sur des hybrides de bananiers cultivés depuis 20 ans à large échelle (pas de fongicides disponibles du fait de l'embargo).

La compréhension de cette problématique a fait l'objet du projet CaBaRé (Réseau Caribéen sur les maladies émergentes des bananiers) que j'ai coordonné de 2011 à 2015 (avec 5 partenaires de recherche).

#### **Mise en évidence du contournement de résistance quantitative**

Une enquête pour mesurer la sévérité de maladie a été réalisée à Cuba et en République dominicaine respectivement sur l'hybride FHIA 18 et FHIA21, deux hybrides de bananier dessert et de plantain issus du programme d'amélioration génétique d'Honduras et cultivés dans ces pays pour leur niveau de résistance quantitative. L'enquête avait comme double objectif de confirmer ou pas les observations de contournement de résistance faites par les partenaires et de les expliquer (i) soit par des facteurs

environnementaux (climatiques, édaphiques et culturels –pratiques) soit (ii) par une adaptation du champignon aux résistances des hybrides.

Le niveau de maladie a été mesurée (ponctuellement et avec une échelle visuelle) sur 25 à 33 parcelles selon le pays. A Cuba, le niveau de sévérité est statistiquement équivalent entre l'hybride et le plantain sensible à la maladie alors qu'en République dominicaine, l'hybride a un niveau de maladie légèrement inférieur (Figure 7). L'enquête révèle également une pression de maladie bien inférieure en République dominicaine. Ces enquêtes d'une durée de 3 mois sur place, ont été réalisées par A.Cavalier, VSC recrutée sur le projet.

Pays	Cuba		République dominicaine	
Variétés	FHIA-18	Plantain	FHIA-21	Plantain
Indice de sévérité /plante	23,3 a*	24,8 a	10,6 b	13,6 c

\* : les moyennes présentant les mêmes lettres ne sont pas statistiquement différentes, selon le test de Fisher au seuil de 5%.

**Figure 7:** Indice de sévérité moyen mesuré sur plantain et sur les hybrides FHIA-18 (24 parcelles) et FHIA-21 (33 parcelles), respectivement à Cuba et en République dominicaine.

On a pu relier (statistiquement) le niveau de maladie sur ces 2 hybrides et sur plantain à des facteurs climatiques (pluie), édaphiques et culturels (cf paragraphe 1.1). Cette étude fait l'objet d'une publication en cours de soumission (**Publication PS3**).

### **Mise en évidence de l'adaptation du pathogène en réponse à la résistance**

Suite à l'enquête, une collection d'isolats (500) a été constituée dans 3 localités/pays sur les hybrides et sur plantain (40 isolats/localité/variété). Une approche de génome scan par séquençage complet de pool d'individus (pool-seq) a été suivie (et réalisée par mon collègue généticien des populations J.Carlier). Par une analyse hiérarchique de la structure des populations, une évolution convergente a été détectée entre cultivars et pays dans 16 régions génomiques, mettant en évidence l'évolution du pathogène en réponse à la résistance de l'hôte. Ces résultats suggèrent une base polygénique de l'adaptation du pathogène à la résistance quantitative des deux hybrides. D'après les informations connues sur leur pédigrée, l'origine commune de source de résistance pourrait expliquer la même évolution. L'annotation des régions sélectionnées a permis de proposer les premiers gènes candidats qui seraient impliqués dans le pouvoir pathogène. Ces travaux ont été soumis récemment à publication. (**Publication PS1**).

*PS1. Carlier J., Zapater MF. Bonnot F., Roussel V., Habas R., Ravel S., Martinez T, Perez-Vicente L., **Abadie C.**, Wright S. Convergent adaptation to quantitative host resistance in a major plant pathogen. Soumise à **Molecular Biology and Evolution**.*

*Po16. Dumartinet T., Ravel S., Bonnot F., Roussel V., Lubin N., Chilin-Charles Y., Trouspance Y., Aguayo J., **Abadie C.**, Carlier J. 2019. Epidemiosurveillance in the French West Indies of genotypes involved in the adaptation to varietal resistances in the fungus *Pseudocercospora fijiensis* causing the black leaf streak disease of banana. In 30<sup>th</sup> Fungal Genetics conference Asilomar, USA, 11-15/03/2019.*

## 4. Dynamique de populations pathogènes émergentes

Les maladies végétales émergentes sont souvent caractérisées par des expansions géographiques importantes et sont ainsi considérées comme des invasions biologiques (Anderson *et al.*, 2004). Celles-ci se définissent comme tout établissement et expansion réussie d'une nouvelle espèce dans une région géographique où elle n'était pas indigène.

Il peut être considéré que le succès de l'établissement et l'expansion de populations envahissantes résultent de scénarios démographiques complexes tels que les goulots d'étranglements ou l'admixture (Estoup et Guillemaud, 2010) qui doivent être couplés à des facteurs environnementaux favorables (réceptivité de la plante, climat...). Parmi les invasions biologiques, 40% sont des émergences fongiques (Brown et Hovmoller, 2002 ; Desprez-Loustau *et al.*, 2007).

Par une approche de phylogéographie, nous avons décrit l'émergence de *Pseudocercospora fijiensis*, champignon ascomycète responsable de la maladie des raies noires du bananier, à différentes échelles spatiales et ce à travers l'étude de son histoire d'invasion et nous avons étudié les facteurs favorables à son émergence par des approches de modélisation.

### 4.1 Histoire d'invasion

La maladie des raies noires ou cercosporiose noire a été décrite pour la 1<sup>ère</sup> fois en 1963 à Fidji sous forme épidémique dans une plantation commerciale de bananiers dessert. Elle a été signalée de façon concomitante en Afrique (Zambie, 1973) et en Amérique latine (Honduras, 1972). Elle s'est répandue de façon globale en une vingtaine d'années dans toutes les zones de production bananières tropicales d'Asie, d'Afrique et d'Amérique latine.

L'étude de l'émergence globale de la cercosporiose noire à travers la reconstruction de son histoire d'invasion a fait l'objet de la thèse de Stéphanie Robert (2008-2012) que j'ai co-encadrée. Elle a fait appel à la génétique des populations classique (discipline maîtrisée dans l'équipe) et a permis grâce à la phylogéographie de reconstruire des routes d'invasion, apportant de nouvelles compétences et reconnaissance scientifique dans l'équipe. L'évaluation de scénarios d'invasion a pu être réalisée à l'aide d'approches bayésiennes de données de génotypages rendues possibles pour les champignons grâce à l'adaptation du logiciel DIYABC par V. Ravigné co-encadrante de la thèse (Cornuet *et al.*, 2010).

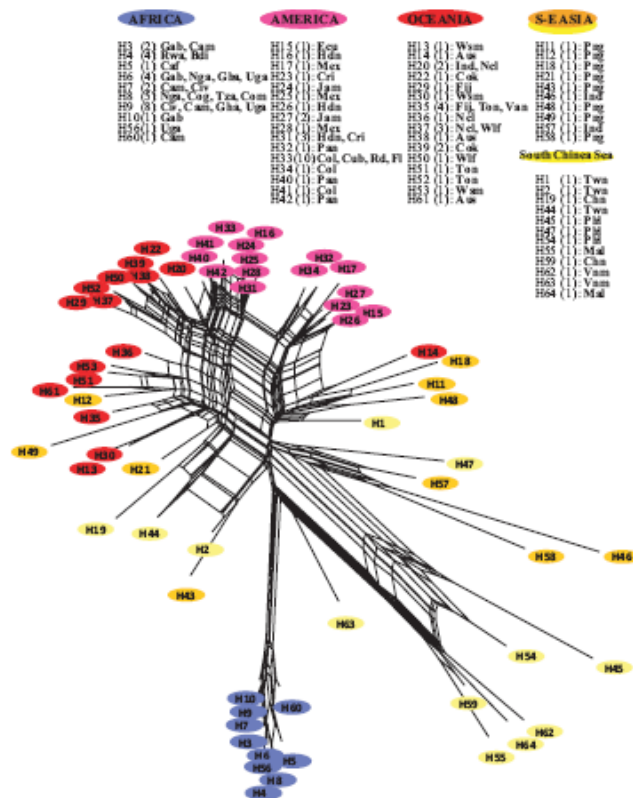
#### **Reconstruction de l'émergence mondiale et continentale**

Un échantillonnage global de 735 isolats issus de 37 pays a été génotypé à l'aide de deux types de marqueurs développés par S. Robert : 21 marqueurs polymorphes microsatellites (informant sur les voies de propagation continentale et événements démographiques) et 8 séquences nucléaires peu polymorphes (permettant de lier des populations sources à des populations envahissantes).

Cette étude à l'échelle mondiale publiée (**Publication P12**) a confirmé la forte différenciation génétique entre les populations de chaque continent et au sein de chaque continent, comme une étude antérieure de notre équipe l'avait montrée sur un échantillonnage plus faible (6 pays/continent et une localité/pays) pour l'Afrique et l'Amérique-latine/Caraïbe (**Publication P5**). Les travaux de S.

Robert ont permis de préciser que le Sud-Est asiatique (incluant la Malaisie, Philippines, Papouasie Nouvelle Guinée mais excluant Fidji -1<sup>ère</sup> zone de description de la maladie-), était le centre de diversité de *P.fijiensis*. Le Sud-Est asiatique étant également le centre d'origine du bananier, le pathogène et son hôte ont pu coévoluer pendant la domestication du bananier.

L'étude a permis de suggérer des scénarios très différents d'invasion continentale du pathogène à savoir (Figure 8) : une introduction unique en Afrique en provenance de la Mer de Chine méridionale (Malaisie, Philippines) associée à une réduction importante de la diversité génétique du pathogène et l'introduction en Amérique latine d'un mélange de populations (admixture) en provenance de PNG et d'Océanie par introductions successives ou mixtes.



**Figure 8 :** Réseau d'haplotypes à partir des séquences de huit gènes nucléaires. Cette méthode permet de rendre compte des possibles recombinaisons entre gènes ; les couleurs sont fonction de l'origine avec bleu (Afrique), rose (Amérique), rouge (Océanie), orange (Asie du Sud Est), jaune (Mer de Chine).

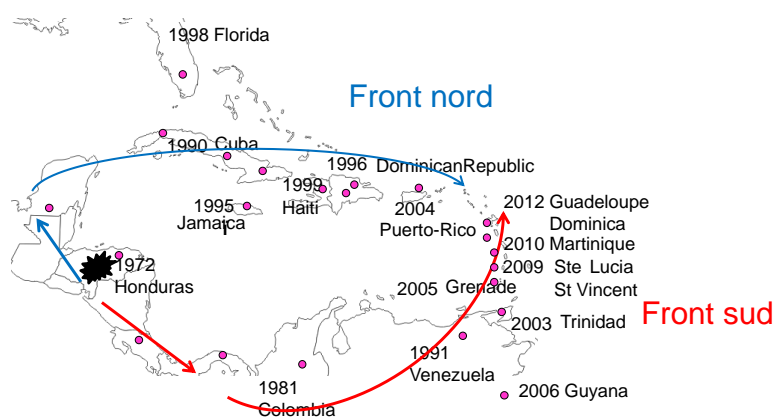
Les scénarios suggérés ont été validés par une approche bayésienne (DYABC). Pour l'Amérique latine, le scénario d'admixture est le plus probable (probabilité de 0.8), pouvant s'expliquer par l'introduction de rejets de bananiers en provenance d'Asie pour monter une collection pour un programme d'amélioration génétique en Honduras (**Publication P17**). Ensuite compte-tenu des données historiques, la progression au nord et au sud de l'Honduras a dû se faire par voie naturelle.

Pour l'Afrique, l'introduction et l'invasion semblent avoir suivi un scénario avec une introduction plutôt vers l'Ouganda avec une progression par saut sur le continent ce qui contredit les données historiques. Ces scénarios sont en cours de tests dans le cadre du post-doc d'Aude Gilabert financé par le projet E-Space et une publication est envisagée (coordonnée par V.Ravigné).

Cette thèse a mis en évidence le rôle primordial de l'homme dans l'émergence mondiale et continentale de cette maladie.

## Reconstruction de l'émergence dans les Caraïbes

Une étude similaire a été entreprise dans les Caraïbes, zone récente d'invasion et plus particulièrement sur le front d'invasion aux Antilles (Figure 9).

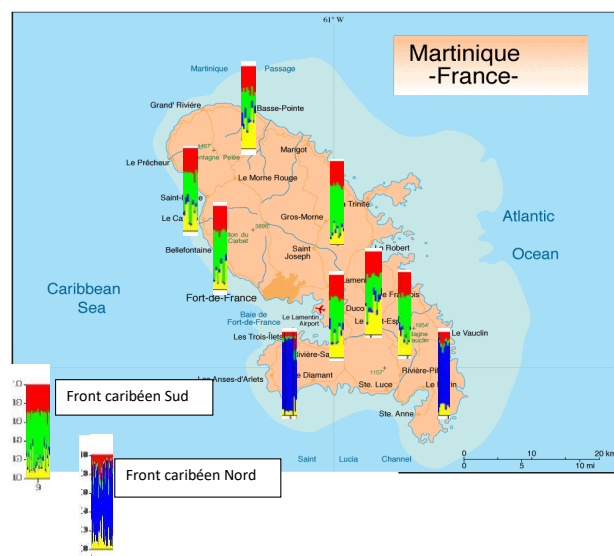


**Figure 9** : Front de progression historique de la cercosporiose noire dans les Caraïbes

Dans les Caraïbes, un échantillonnage massif de 1800 isolats a été constitué sur les 2 fronts d'invasion, dans 12 pays des Caraïbes et 8 d'Amérique centrale et au nord de l'Amérique latine à raison de 30 populations d'une trentaine d'isolats/population. Cet échantillonnage massif a pu être réalisé grâce à la mise en place dès 2006 (à mon initiative) d'un réseau régional de partenaires institutionnels (Ministère de l'agriculture) et de recherches dans les Caraïbes et aux Antilles et a été financé par quatre projets de recherches (projet FCR, ANR Emerfundis, Feder-Gestions des Risques, Feder MALIN).

Aux Antilles, compte-tenu du statut d'organisme de quarantaine du pathogène et de la détection précoce de la maladie, un échantillonnage intensif (350 isolats/île) hiérarchique a été réalisé entre 2011 et 2013 (Martinique) et de 2014 à 2015 en Guadeloupe (par moi-même et mon équipe) pour décrire précisément l'origine de la maladie et son mode d'introduction. Le génotypage de ces 2000 isolats a été réalisé avec 12 à 16 marqueurs microsatellites.

Les analyses d'assignation (logiciel Structure) montrent que l'Honduras est bien la source de la maladie pour les Caraïbes, qu'il existe deux fronts génétiques différents dans les Caraïbes correspondant aux 2 fronts de progression géographique ce qui suggère une introduction plutôt par voie naturelle (vent). Aux Antilles, la reconstruction de l'histoire d'invasion est différente et très informative. En effet, les résultats suggèrent au moins 2 introductions indépendantes en Martinique (Figure 10), d'origine différente et géographiquement opposée (une depuis le sud et une depuis le front nord), suivi de l'introduction de mélanges des populations (admixture) de Martinique en Guadeloupe. Cette étude suggère deux modes d'introduction différents en Martinique : une par voie naturelle depuis le sud (vent sud-nord fréquents) et une depuis le nord qui serait plutôt d'origine anthropique (car les vents Nord-sud sont très rares et il est interdit d'introduire tout matériel végétal de bananiers aux Antilles). En Guadeloupe, l'introduction serait plutôt due à une arrivée de mélanges de spores par voie naturelle de Dominique et Martinique.



**Figure 10:** Structure des populations de *M. fijiensis* en Martinique, chaque rectangle correspond à la proximité génétique des isolats des différentes localités et ce en comparaison avec ceux obtenus dans les fronts Sud et Nord

Compte-tenu de l'échantillonnage important de cette étude, une publication pour Plos One est en préparation pour soumission mi 2019.

P5. Rivas G., Zapater MF, **Abadie C.** and Carlier J. 2004. Founder effects and stochastic dispersal at the continental scale in the fungal pathogen of banana *Mycosphaerella fijiensis*. **Molecular Ecology** 13: 471-482.

P12. Robert S., Ravigné V., Zapater M.-F., **Abadie C.**, Carlier J. 2012. Contrasting introduction scenarios among continents in the worldwide invasion of the banana fungal pathogen *Mycosphaerella fijiensis*. *Molecular Ecology* 21:1098-1114.

P17. Robert S., Zapater MF., **Abadie C.**, Carlier J., Ravigné V. 2015. Multiple introductions and admixture at the origin of the continental spread of the fungal banana pathogen *Mycosphaerella fijiensis* in Latin America: a statistical test using Approximate Bayesian Computation. *Revue d'Ecologie – La Terre et la Vie*, 70 sup 12 :127-138

Zapater MF, **Abadie C.**, Robert S. et al. Carlier J. Deciphering colonization dynamics of the black leaf streak disease of banana through the Caribbean islands. *En préparation à PLOS One Pathogens*

## 4.2 Compréhension des facteurs d'émergence

Lors de son émergence mondiale, la cercosporiose noire a toujours été détectée dans les zones d'invasion sur des bananiers déjà infectés par la cercosporiose jaune, une maladie apparentée due à *Pseudocercospora musicola*. Sa gamme d'hôte est plus large (attaque les plantains), son cycle infectieux plus court (d'une semaine environ) et ces capacités de reproduction asexuée beaucoup plus faible et les optimums climatiques différents.

Nous avons étudié trois facteurs d'émergence par des approches différentes.

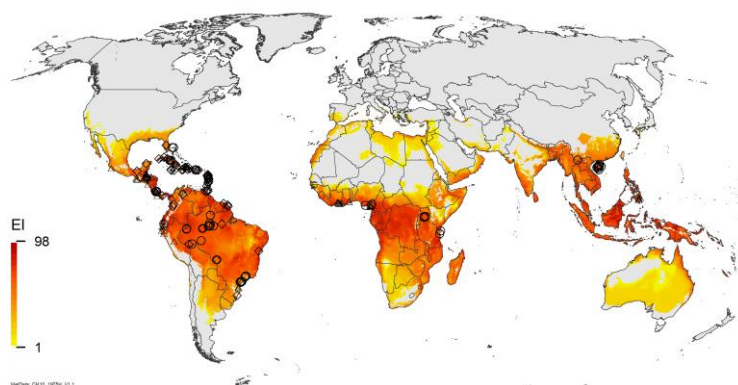


### Stratégie de vie

Comme il a été suggéré que le taux de reproduction de base  $R_0$  ne dépend pas de la reproduction sexuée (Ravigné *et al.*, 2017), pour expliquer le remplacement de *P.musicola* par *P.fijiensis*, nous nous sommes intéressés dans la thèse de Stéphanie Robert à l'importance des traits d'histoire de vie liés à l'infection (période d'incubation et efficacité d'infection) et la reproduction asexuée (période de latence asexuée et capacité de sporulation conidienne). Une vingtaine d'isolats de chaque espèce a été inoculée à une même concentration sur des fragments de feuilles maintenues en survie selon la même méthode mise au point pour étudier les composantes de résistance du bananier (**Publication 8**). L'analyse de la cinétique d'apparition et de croissance des lésions sur les fragments suggère une efficacité d'infection supérieure pour *M.fijiensis* et des périodes d'incubation et de latence asexuée plus courtes. Ces traits d'histoire de vie pourraient lui conférer un avantage adaptatif lors de l'invasion. Ces résultats n'ont pas pu faire l'objet de publication.

### Aptitude climatique

Une analyse de risque d'établissement de la maladie a été réalisée à l'échelle mondiale par des collègues australiens qui se sont basés sur l'estimation d'un indice écoclimatique calculé à l'aide d'optimums climatiques du cycle de vie du pathogène étudié (température, humidité du sol, stress thermique et hydrique) (Figure 11). L'analyse a été réalisée à l'aide du logiciel et modèle Climex développé dans leur équipe (Kriticos *et al.*, 2015).



**Figure 11 :** Aptitude climatique (EI) de *Mycosphaerella fijiensis* modélisé à l'échelle mondiale sous selon la température et un scénario d'irrigation (5 mm day<sup>-1</sup>)

Les jeux de données géo-localisées acquis pour nos études sur l'histoire d'invasion ont été fournis pour d'une part paramétrer leur modèle et d'autre part le valider. Une publication a été soumise. Les cartes de risques obtenues confirment les données historiques et prédisent que la maladie pourrait s'installer dans des zones subtropicales (sud et nord de l'Afrique, Australie) sous des scénarios d'irrigation (**Publication soumise PS2**).

### Effet du paysage

L'effet de la structure du paysage dans l'invasion de la cercosporiose noire du bananier a été étudié à l'échelle d'un territoire insulaire (Martinique) par une démarche de modélisation. Cette étude a été réalisée dans le cadre de la thèse de Clara Landry que j'ai encadrée (2011-2015) pendant laquelle j'ai été impliquée en tant qu'expert auprès des services de l'état et de la profession bananière dans la détection et le suivi de l'invasion de la maladie en Martinique.

La maladie a été détectée pour la 1<sup>ère</sup> fois en Martinique en septembre 2010 sur une des 20 parcelles sentinelles du réseau d'épidémiologie mis en place depuis 2 ans. Les services de l'état (DAAF) et la FREDON (Fédération Régionale de Défense contre les Organismes Nuisibles) ont réalisé un suivi spatiotemporel de la maladie de septembre 2010 à mai 2012 (83 semaines). La détection correspondait à une détection de symptômes douteux confirmés par un diagnostic en laboratoire, il s'agissait donc bien de vrais positifs. Ainsi, nous avons disposé d'un jeu de 1635 données géoréférencées d'incidence (présence ou absence) de la maladie détectée sur 5 types de bananiers (Cavendish, plantains, jardin créole, jardin privé et spontanés sur le bord des routes).

De façon similaire à Cook *et al.* (2007) qui a analysé la structure du paysage sur la dynamique d'extension d'une plante invasive en Finlande, C. Landry a développé un modèle de métapopulation dans lequel l'espace est discrétisé en patchs (1236 patchs de 1 km<sup>2</sup>) associés à des covariables liées au paysage : le type de bananier (toutes les variétés de bananier n'ont pas la même sensibilité à la maladie) et les hauteurs de pluie, traduisant la capacité du patch à propager l'épidémie.

Le modèle développé est un modèle spatio-temporel stochastique basé sur des processus ponctuels qui permet de calculer l'intensité du processus selon la réceptivité du patch à la maladie. Compte-tenu du fait que les données étaient censurées (temps de contamination inconnu) et incomplètes (patchs non renseignés), l'estimation bayésienne des 8 paramètres du modèle a été réalisée à l'aide d'un algorithme MCMC d'Hastings-Metropolis avec augmentation de données (reconstruction des temps de colonisation exacts des patchs dans les intervalles de temps pendant lesquels les colonisations ont eu lieu (Catterall *et al.*, 2012). Cet algorithme a été validé sur des données artificielles et a permis de décrire les lois a posteriori de chaque paramètre (Figure 12).

Parameter	Posterior Mean	Posterior standard error	Quantile 2.5%	Quantile 97.5%
$\beta$	1.991	0.655	1.069	1.325
$\gamma$	-2.124	1.454	-4.574	0.861
$r_1$	5.58e-03	2.98e-03	6.07e-04	0.012
$r_2$	1.303e-02	3.684e-03	6.383e-03	0.021
$r_3$	5.746e-03	4.132e-03	2.815e-04	0.015
$r_4$	4.418e-03	1.292e-03	2.25e-03	0.0072
$r_5$	2.473e-03	1.793e-03	1.77e-04	0.0069

**Figure 12 :** Estimation bayésienne des 7 paramètres du modèle spatio-temporel stochastique de temps de colonisation de la cercosporiose noire lors de son invasion en Martinique. Moyenne empirique, erreur standard et 2.5% et 97.5% des quantiles de chaque paramètre.

La comparaison de la valeur des paramètres estimés suggère que les jardins privés ( $r_2$ ) et les plantains ( $r_5$ ) ont eu le plus fort impact sur l'invasion. Ce résultat est lié à la conceptualisation même du modèle qu'il n'a pas été possible de valider puisque les données n'ont plus été acquises après 83 semaines. Cette étude dont l'intérêt majeur est plus méthodologique en particulier sur la reconstruction de données censurées doit être soumise très prochainement pour publication.

Yonow T., Kriticos DR, Ramirez-Villegas J., **Abadie C.**, Darnell RE., Noboru Ota. *Black leaf streak disease of bananas: Ecoclimatic suitability and relationship with disease pressure assessments. Soumise à PLOS One.*

Landry C., **Abadie C.** Bonnot F., Vaillant J. *A spatio-temporal stochastic model for an emerging plant disease spread in a heterogeneous landscape. En préparation pour soumission à Bulletin of Mathematical Biology mi 2019.*

### 4.3 Enseignement épidémiologique grâce aux études sur les émergences de maladies

Les études de l'histoire d'invasion ainsi que des facteurs d'émergence ont permis de confirmer certaines connaissances épidémiologiques et d'en acquérir des nouvelles.

#### ***Potentiel d'adaptation des agents pathogènes***

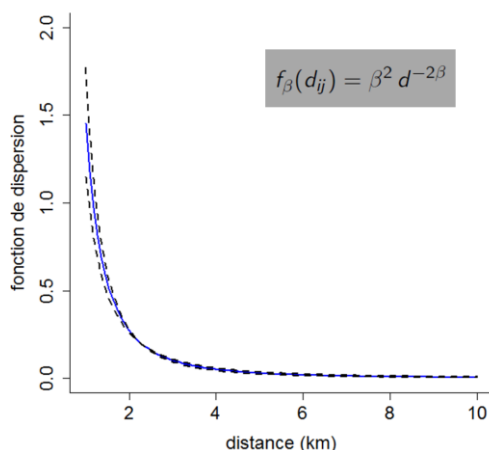
Les études sur l'histoire d'invasion ont confirmé un niveau de diversité génétique très élevé chez *P.fijiensis* et ont mis en évidence pour la première fois des phénomènes d'admixture lors de l'invasion de la maladie en Amérique latine et plus récemment en Martinique. Cela confirme le fort potentiel d'adaptation chez ce pathogène. Le maintien d'allèles et leur transmission dans les populations sur le front d'invasion peut engendrer une augmentation d'agressivité du pathogène ou sur le front d'invasion, sélectionner des individus portant des gènes répondant à une pression de sélection dans la zone d'origine. De ce fait les individus invasifs pourraient être préadaptés à l'utilisation d'un fongicide spécifique ou d'une variété résistante rendant de ce fait ces méthodes de lutte inefficaces.

#### ***Fonction de dispersion***

Nous avons tout d'abord appréhendé la dispersion à longue distance par une approche de génétique de populations en estimant les flux de gènes sur des transects de 250 à 300 km et ce au Cameroun et au Costa-Rica. J'ai organisé et réalisé le transect au Cameroun. Dix à 15 populations pathogènes (30 isolats/population) ont été constituées tous les 25-30 km et génotypées (par F.Halkett en post-doc dans l'équipe) à l'aide 19 marqueurs microsatellites (soit un total de 600 isolats). La diversité génétique le long du transect a été analysée selon le modèle d'isolement par la distance (Leblois *et al.*, 2004). Cependant à cette échelle, nos analyses ont montré une dispersion de type stochastique au Costa-Rica et une discontinuité génétique au Cameroun expliquée soit par des barrières physiques ou les traces d'histoire de colonisation différente (**Publication P9**).

Sur un territoire isolé d'une centaine de km de long, nous avons pu établir une fonction de dispersion (primaire) à longue distance grâce à l'inférence de paramètres du modèle d'invasion développé par ma doctorante C.Landry pour étudier l'effet du paysage (cf paragraphe 3.2).

Nous disposons dans l'équipe de fonction de dispersion sur une distance maximale de 1 km (Rieux *et al.*, 2014) pour chaque type de spores acquises grâce à une approche expérimentale. Dans ces expérimentations, il a été observé que les ascospores pouvaient se disperser jusqu'à 1km et des observations sur des résistances à des fongicides ont permis de déduire que les ascospores s'étaient dispersés jusqu'à 6km. Notre étude a permis de paramétrer une fonction de dispersion à longue distance (>10 km), applicable à l'échelle d'un bassin de production ou d'un territoire comme la Martinique (Figure 13). Ces résultats seront publiés dans la même publication que l'effet du paysage.



**Figure 13:** Fonction de dispersion à longue distance estimée à partir des données de suivi spatiotemporelle de l'invasion de la cercosporiose noire en Martinique ( $\beta = 1.991 \pm 0.655$ )

### **Vitesse de propagation**

Dans certains pays récemment infestés par la cercosporiose noire, nous avons pu acquérir des données historiques de lieu et date des 1ères détections de la maladie. A Trinidad, où l'invasion a duré 5 ans, nous avons pu montrer par une analyse de variogramme un gradient Sud/Nord et calculé une vitesse de progression de la maladie de l'ordre de 3km/mois. Dans les autres pays, la vitesse a varié de 1 à 10 km/mois. Pour une maladie à dispersion aérienne, dans des contextes où l'hôte est présent et toujours réceptif à la maladie, cette vitesse peut paraître faible mais elle peut s'expliquer par une dynamique de populations lente particulière au contexte invasif. Il a été montré par modélisation que seule la reproduction asexuée de *P.fijiensis* pouvait permettre à la maladie de se maintenir (Ravigné *et al.*, 2017). En Guadeloupe, il a été observé la reproduction du pathogène plus de 2 ans après sa 1<sup>ère</sup> détection confirmant que ce type de reproduction dépend de la densité de lésions sur les feuilles.

P9.Halkett F., Coste D., Rivas G., Zapater M-F, **Abadie C.**, Carlier J. 2010. Genetic discontinuities and disequilibria in recently established populations of the plant pathogenic fungus *Mycosphaerella fijiensis*. **Molecular Ecology** 19 p 3909-3923.

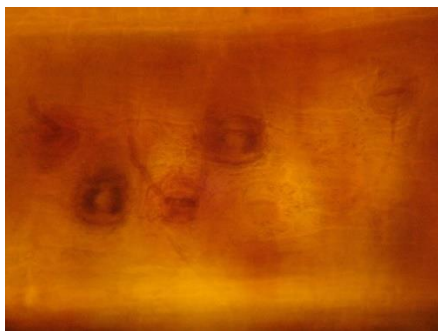
## **4.4 Expertise technique au service des réseaux d'épidémiosurveillance**

Compte-tenu de nos connaissances sur la biologie du champignon et la génétique de populations acquises pendant mes affectations au Cameroun et à Montpellier, et de l'absence de la maladie dans les petites Antilles à mon arrivée en Guadeloupe en 2006, j'ai initié la mise en place d'un réseau de partenaires sur les cercosporioses noire dans les Caraïbes (avec organisation d'un 1<sup>er</sup> workshop dès octobre 2006) permettant d'échanger entre les pays producteurs de bananes atteints par la maladie et ceux encore indemnes.

Aux Antilles, j'ai initié la mise en place avec les services de l'état et les fédérations régionales d'éradication des organismes nuisibles (FREDON) de réseaux d'épidémiovigilance de la maladie basée sur une surveillance visuelle du territoire de façon aléatoire mais aussi fixe (sur parcelles sentinelles de plantains (résistants à la cercosporiose jaune et sensibles à la cercosporiose noire).

Des outils de diagnostic rapide ont été mis au point dans notre laboratoire de Montpellier : le 1<sup>er</sup> rapide et peu onéreux se base sur l'observation microscopique de lésions sporulantes en conidies

**(Publication 6)** et un 2<sup>ème</sup> plus précoce basé sur un diagnostic moléculaire (Henderson *et al.*, 2003) a été mis au point directement sur lésions (extraction d'ADN à partir de broyat de lésions et non de cultures du champignon). Ces techniques ont été transférées à travers 3 formations dispensées aux partenaires techniques des ministères de l'agriculture de St Vincent, St Lucie, la Dominique et des DOM (Réunion, Guyane, Guadeloupe et Martinique).



**Figure 14:** Observation microscopique (\*20) de conidiophores géniculés typiques de *Pseudocercospora fijiensis*, sur un fragment de bananier Cavendish, à Ste Lucie en janvier 2010, officialisant la 1<sup>ère</sup> détection de la maladie.

C'est sur une parcelle de plantain du réseau de surveillance que la 1<sup>ère</sup> détection de la maladie a été faite en janvier 2010 à Ste Lucie (Figure 14) et en septembre 2010 en Martinique (**Publication 11**).

Ces outils de diagnostic ont permis de détecter la maladie de façon précoce dans les Antilles anglaises et très précoce aux Antilles françaises. Cependant et contrairement à l'Australie, cette détection précoce n'a malheureusement pas permis d'éradiquer la maladie. Cette situation (non éradication) peut s'expliquer par des raisons biologiques (proximité (50km) de sources d'inoculum proches, des raisons organisationnelles dans l'application des réglementations (plus sévères en Australie), de moyens financiers et techniques mis en œuvre lors d'une invasion (arrachage et enfouissements de plants...) et de proximité l'existence de bananiers spontanés sur tout le territoire.

Les études menées sur l'histoire d'invasion ont permis d'élucider l'origine de la maladie aux Antilles, de préciser les modes d'introduction et de montrer l'existence d'admixture. Ces informations ont été partagées avec les services de l'état et ont suscité un renforcement des contrôles aux frontières.

P6. Zapater MF, **Abadie C.**, Pignolet L. Carlier J., Mourichon X. 2008. *Diagnosis of Mycosphaerella spp. responsible to Mycosphaerella leaf spot diseases of bananas and plantains through morphotaxonomic observations. Fruits* 63 (6), p389-393

P11. Ios R. and Hubert J., **Abadie C.**, Duféal D., Opdebeeck G., Iotti J. 2011. *First report of Black Sigatoka disease caused by Mycosphaerella fijiensis on Martinique Island. Plant Disease* 95 (3), p359

# Projet de recherche

Les travaux que j'ai réalisés jusqu'à présent ont porté d'une part sur l'analyse des facteurs environnementaux (pratiques culturales, édaphiques ...) et d'autre part sur l'effet des composantes de résistance quantitative qui influent sur les dynamiques de maladie. Je me suis également intéressée à la compréhension d'une émergence de maladie et ce de façon plus conjoncturelle (étant basée en Guadeloupe sur le front de progression de la maladie). La lutte contre les maladies végétales passe d'une part par la prévention pour éviter l'introduction de maladies exotiques et d'autre part dans la compréhension des épidémies pour concevoir de façon optimale des méthodes de lutte efficaces durablement. Vis-à-vis des maladies tropicales de cultures pérennes, l'utilisation de la résistance quantitative est une composante primordiale pour le contrôle des maladies (Ploetz, 2007) pour des raisons diverses d'ordre biologique (forte pression parasitaire), techniques (pas de nécessité de moyens supplémentaires, larges surfaces contrôlées), économiques (pas ou peu d'applications fongicides) et écologiques (pas de pollutions dues aux pesticides). Par contre les longues pressions de sélection des pathogènes par la résistance de l'hôte exigent de considérer le contrôle de maladie en terme d'efficacité et de durabilité.

Pour gérer le déploiement des variétés résistantes en vue d'un contrôle efficace et durable des maladies, une stratégie évoquée de plus en plus souvent dans la littérature est de jouer sur les forces évolutives universelles (systèmes sauvages et agricoles), l'évolution des agents pathogènes étant la résultante des 5 différentes forces évolutives (mutation, dérive génétique, migration/flux de gènes, recombinaison/système de reproduction, sélection) (Mc Donald et Linde, 2002). Le taux de mutation et la dérive génétique ne sont pas directement actionnables par l'homme contrairement aux autres forces. En effet, les résistances variétales (quantitative et qualitative) en particulier les stratégies d'utilisation de ces résistances dans le temps et l'espace peuvent jouer sur la migration (exemple par espacement entre variétés sensibles et résistantes), la recombinaison (exemple de variétés réduisant les taux de production) et la sélection (exemple de taux plus élevé pour une résistance qualitative que quantitative). C'est l'équilibre entre ces forces qui confère la durabilité des résistances même si Parleviet considère qu'en terme évolutif la résistance ne dure jamais pour toujours et doit être vue plutôt comme un gradient allant de la résistance éphémère à résistance forte (Parleviet, 2002).

Ainsi, l'homme de par les choix qu'il fait pour la création/sélection de variétés résistantes et des stratégies qu'il adopte pour le déploiement de ces variétés dans un paysage agricole a un rôle important dans la durabilité des résistances.

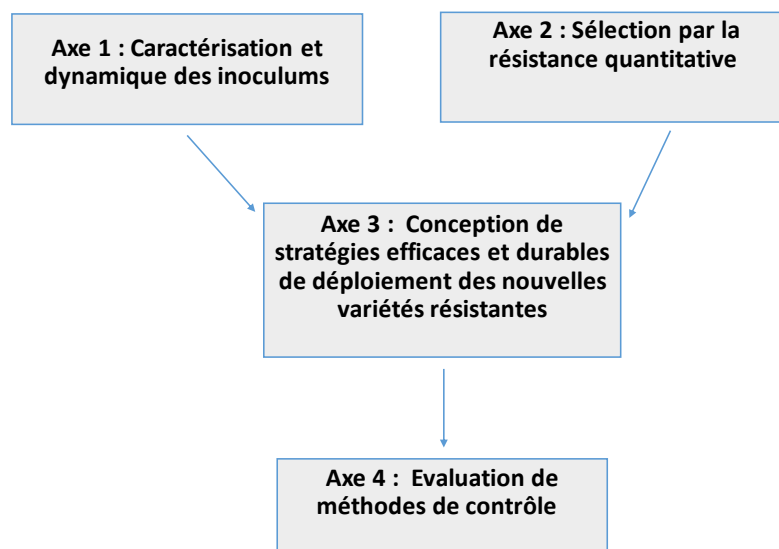
Comme le synthétise Mundt (2014), l'étude de la durabilité passe par la compréhension des mécanismes moléculaires de l'interaction pathogènes et des stratégies de déploiements des variétés résistantes (selon le type de gènes). Les études de génétique et génomique de populations permettent d'élucider les mécanismes alors que la modélisation permet d'étudier un panel des stratégies de déploiement dans l'espace et le temps, impossible à évaluer de façon expérimentale.

Les premiers modèles de durabilité de la résistance aux maladies des plantes ont été récemment publiés (Fabre *et al.*, 2015 ; Bourget *et al.*, 2015) mais restent assez théoriques. Des travaux plus récents appliqués à la rouille des céréales montrent que le pyramidage des gènes et le fractionnement du paysage sont les paramètres essentiels pour une bonne durabilité (Papaix *et al.*, 2014 ; Rimbaud *et al.*, 2018).

Pour des grandes plantes comme le bananier, nécessitant beaucoup d'espace, l'approche de modélisation est devenue essentielle dans ma démarche scientifique. L'utilisation d'un modèle dépend de son réalisme donc de la qualité du paramétrage.

Dans les modèles de dynamiques de populations, les valeurs de densités d'inoculum sont importantes et souvent peu connues. Le développement de l'aérobiologie couplant des quantifications moléculaires ont permis au cours de la dernière décennie de mesurer de façon précise des concentrations de spores dans l'air en utilisant des pièges à spores de type Hirst (Kennedy et Wakeham, 2015) ou de type volumétrique (Carisse *et al.*, 2014).

J'ai démarré mes travaux sur la lutte contre cercosporiose noire des bananiers au Cameroun et ai retrouvé la même problématique 10 ans après en Guadeloupe, après avoir étudié son émergence dans les Caraïbes. Pour mon projet futur, je souhaite me focaliser sur la conception de stratégies efficaces et durables de déploiement de nouvelles variétés résistantes à la cercosporiose noire. Pour atteindre cet objectif, je propose de suivre 4 axes complémentaires : un sur la caractérisation et la dynamique des inoculums aériens (axe 1), un sur la sélection des populations pathogènes par la résistance quantitative (axe 2), un pour concevoir ces stratégies (axe 3) et un pour évaluer l'efficacité de méthodes de contrôle (axe 4).



## Axe 1 : Caractérisation et dynamique des inoculums

Une meilleure compréhension du fonctionnement épidémique au niveau du bananier et de la parcelle est nécessaire pour concevoir des méthodes de lutte efficaces. En effet, la dynamique d'inoculum peut être perturbée par des facteurs climatiques (non manipulables par l'homme), des pratiques culturales et par des choix variétaux. Cependant l'effet de ces facteurs dépend d'une part de la composition de l'inoculum (ratio entre conidies et ascospores qui n'ont pas les mêmes caractéristiques à l'infection) et d'autre part du ratio entre l'auto-inoculum (inoculum produit par les organes infectés de la même plante) et l'allo-inoculum (inoculum produit à l'extérieur par des plantes voisines). La dynamique quantitative d'inoculum a été très peu étudiée sur ce champignon. A ma connaissance, une seule thèse (au Nigéria) et deux études réalisées au Costa-Rica (Burt 1997, 1998 in Guzman *et al.* 2018) ont permis d'obtenir des premières informations de concentration de spores dans l'air (Gaulh, 1994).

Compte-tenu des connaissances acquises sur la distance de dispersion horizontale des 2 types de spores produits par le champignon (3m pour les conidies, 200 m pour les ascospores), j'estime que l'allo-inoculum est plutôt dispersé par l'air horizontalement et que l'auto-inoculum est dispersé verticalement par l'air (entre feuilles de bananier) et l'eau (ruissellement de conidies sur une même feuille). Une première étape est de mettre au point une méthode de quantification des inoculums.

Pour l'inoculum aérien, des études préliminaires, réalisées au Cameroun, à l'aide de plants pièges (cultivés en pot) disposés dans des parcelles sensibles et résistants (cf paragraphe 3.3) avaient suggéré des niveaux d'allo-inoculum supérieurs à l'auto-inoculum. Cependant, le nombre de lésions sur un plant-piège était apparu toujours inférieur à ceux mesurés sur un bananier voisin planté en plein sol (au même endroit). Cela m'avait amenée à conclure que cette méthode de quantification des spores aériennes étaient variables et non représentatives de l'inoculum capté par un plant cultivé. Pourtant récemment, Poyedebat *et al.* (2018) a utilisé des plants-pièges au Costa-Rica et en Martinique pour mesurer l'abondance de spores dans des bananeraies diversifiées. Mais, cette méthode ne permet pas de distinguer les deux types d'inoculum.

C'est pourquoi je propose de décrire la dynamique des spores dans l'air à l'aide de pièges à spores volumétriques. Une étude préliminaire réalisée dans mon équipe en Guadeloupe sur la cercosporiose jaune avec des pièges à spores de type Buckard-7days qui permettent de capter et projeter l'air (et les spores) sur une bande collante (qui tourne pendant une semaine) n'avait pas permis de quantifier les ascospores (de façon indirecte par PCR-Quantitative après extraction d'ADN sur la bande captée à cause de problème de dégradation de l'ADN par des constituants du gel de capture). Ce problème n'a jamais été soulevé dans les publications jusqu'à maintenant (West et Kimber, 2015). Cette 1<sup>ère</sup> étude a permis de mettre en évidence des pics de conidies (reconnaissables au microscope) au lever et coucher du jour (liée au taux d'humidité élevée à ces périodes), mais avec des concentrations plus faibles que celles décrites dans la littérature et non corrélées aux densités de lésions sur la plante. Des nouveaux pièges à spores volumétriques de type Multivial cyclone sampler (Buckard) ont été acquis récemment sur un projet et ont été évalués en 2018 (stage de Master 2) et ont l'avantage de ne pas utiliser de gel de capture. Ils permettent de capter l'air (sur 1 jour) dans un tube facilitant ainsi le comptage des conidies au microscope et des ascospores par Q-PCR.

Pour l'auto-inoculum, je propose de le mesurer par une double approche : (i) de dynamique de lésions en conditions naturelles, pendant la vie d'une feuille (en comparant les densités de lésions entre feuilles à l'air et recouvertes d'une toile spores proof, la différence devrait permettre d'estimer l'auto-inoculum) et (ii) de génétique de populations (co encadré avec J. Carlier) en génotypant directement les lésions (méthode d'extraction d'ADN directement à partir de lésions en cours dans l'équipe). En effet, les conidies étant issues de la reproduction asexuée et les ascospores de la reproduction sexuée, il est envisageable d'estimer la proportion de reproduction asexuée et sexuée à partir d'une analyse hiérarchique de lésions collectées sur plusieurs feuilles et plusieurs plantes.

A l'aide de ces méthodes de quantification, je propose de mieux comprendre la dynamique épidémique des inoculums (allo et auto-inoculum) à différentes échelles spatiales : en étudiant à l'échelle de la parcelle la dynamique des deux types de spores dans l'air et sur la plante, la dynamique de l'infection et la dynamique des lésions. Cette étude nécessitera la mise en place d'une expérimentation (parcelle) en Guadeloupe (où nous disposons dans l'équipe de pièges à spores). Le positionnement des pièges sera raisonné en fonction de la hauteur de capture et de la position dans la parcelle sachant que les pièges à spores mobiles sont recommandés en surveiller plutôt que des pièges fixes (Savage *et al.*, 2012). Ces dynamiques seront mises relation avec des paramètres climatiques et agronomiques (élimination des feuilles malades, variétés résistantes). Ce thème fera l'objet d'un sujet de thèse à construire.



La contamination sera étudiée en conditions semi-contrôlées pour mesurer l'efficacité d'infection pour les 2 types de spores en prenant en compte la réceptivité des feuilles (selon leur âge, leur position sur la plante) et l'effet de la lumière (les UV étant connus comme létaux pour les spores, Rutter in Guzman *et al.* 2018).

Ce thème permettra (i) d'acquérir une meilleure connaissance sur le fonctionnement épidémique de la cercosporiose à l'échelle d'un bananier et d'une parcelle qui servira à la conception de méthode de lutte ou à l'optimisation de méthodes déjà existantes (Axe 4) et (ii) il permettra d'obtenir des données quantitatives indispensables au paramétrage de modèles épidémiologiques de simulation de la maladie (Axe 3).

## Axe 2 : Mesure de la sélection par la résistance quantitative

Nous avons mis en évidence l'évolution du champignon face à la résistance quantitative sur deux hybrides de bananiers (cf paragraphe 3.4). Des analyses complémentaires ont été réalisées sur les populations pathogènes sélectionnées (=isolées sur les hybrides résistants). Une mesure du niveau d'agressivité (par inoculation des isolats sur fragments de feuilles) réalisée avec les partenaires du projet caribéen (séjours de partenaires au Cirad à Montpellier) montre une plus forte agressivité des isolats issus de bananiers résistants suggérant que l'évolution des traits quantitatifs de ces populations sélectionnées (Qst) est plus forte que l'évolution de la structure génétique de ces populations (Fst). Ce résultat met en évidence que l'érosion de la résistance des 2 hybrides s'expliquent par une plus forte agressivité du champignon. Ces analyses font l'objet de la préparation actuelle d'une publication.

En Guadeloupe, suite à l'observation d'un niveau de maladie très élevé sur un géniteur utilisé dans le programme d'amélioration génétique du Cirad connu pour être très résistant, j'ai constitué en 2016 une collection de 400 isolats sur 4 variétés (2 géniteurs à niveau de maladie élevé ; un hybride avec une résistance durable depuis plus de 5 ans et une variété sensible). L'érosion de la résistance peut s'expliquer soit par une agressivité forte des populations invasives (préadaptées) et/ou par une évolution temporelle des populations pathogènes sur certaines accessions. La 1<sup>ère</sup> hypothèse est privilégiée dans la mesure où nous avons démontré l'existence de populations pathogènes sélectionnées par la résistance quantitative à Cuba et de République dominicaine (cf partie 3.4) et en Guadeloupe l'existence de populations pathogènes provenant de Martinique qui elle-même est un mélange de populations venues du Sud de l'arc caribéen mais aussi du Nord (avec une forte probabilité pour une introduction depuis la République dominicaine). Ainsi des isolats préadaptés à la résistance quantitative ont pu migrer aux Antilles et être mis en évidence sur certaines accessions de bananier de la station du Cirad. J'ai mis en place un suivi épidémiologique depuis 2018 sur une gamme d'accessions de la station.

L'élucidation de cette problématique importante pour le programme d'amélioration du bananier (remise en cause de certains géniteurs) fait l'objet du sujet de thèse de Thomas Dumartinet, démarrée en octobre 2017. Elle est financée par le Cirad et l'ANSES (intéressée par la mise au point de marqueurs moléculaires pour diagnostiquer/surveiller des souches sélectionnées) et pour son fonctionnement par le projet Feder-MALIN (2018-2020). Jean Carlier en est le directeur de la thèse.

Ce thème permettra d'une part d'apporter des connaissances et des recommandations aux généticiens du Cirad (dans le choix de leur géniteurs) et d'autre part d'estimer un taux de sélection due à la résistance quantitative qui pourra être utilisé pour le paramétrage des modèles épidémiologiques (Axe 3).

### Axe 3 : Stratégie efficace et durable de déploiement des nouvelles variétés résistantes

Afin d'accompagner la diffusion des nouvelles variétés résistantes à la cercosporiose noire, créées par le Cirad ou d'autres programmes d'amélioration génétique, je propose de m'intéresser à des stratégies spatiales de déploiement : les mélanges variétaux à l'échelle d'une parcelle et le déploiement des variétés à l'échelle régionale. En effet, la culture bananière en particulier pour l'export est basée sur la culture d'un seul groupe de bananiers (Cavendish) très productif et sensible à la maladie. A ce stade, la reconversion variétale n'est pas envisagée (pour des raisons agronomique et économique). Les réflexions actuelles pour la production se portent sur l'introduction progressive de nouvelles variétés dans des systèmes de productions restant basés sur la variété actuelle sensible à la maladie. De plus il n'existe pas à ce jour de variétés commerciales résistantes à la maladie et accepter pour l'exportation. Il existe d'autres stratégies de déploiement des résistances concernant plutôt l'échelle de la plante et la résistance qualitative (rotation de gènes, pyramidage de gènes) Mundt (2002). Comme nous ne disposons actuellement d'aucun gène de résistance à la cercosporiose noire, nous ne pouvons actuellement concevoir de telles stratégies.

Je propose d'étudier successivement l'efficacité et la durabilité des stratégies de déploiement de nouvelles variétés de bananiers de résistance quantitative dans un paysage agricole de production bananière basé sur une variété sensible.

#### Stratégie efficace

La cercosporiose étant une maladie foliaire dispersée par voie aérienne, l'aspect spatial est donc primordial. Compte-tenu des longues distances de dispersion des ascospores (230m en moyenne), l'approche expérimentale ne nous permettrait pas d'évaluer l'efficacité de dispositifs spatiaux.

Une analyse statistique du niveau de maladie sur plantain (variétés sensibles) cultivés selon cinq dispositifs (quinconce, ligne, petites et grandes mosaïques, monoculture) suggère un bénéfice efficace de la culture en ligne et en quinconce, sachant que la proportion de variétés résistantes/plantain était de 25% et que l'effet est différent en avant floraison (=émission foliaire constante) qu'après floraison (=arrêt de l'émission de nouvelles feuilles). De plus j'ai réalisé cette analyse à partir de jeux de données indépendant collectées pour des expérimentations réalisées au Cameroun pour d'autres objectifs (sélection variétale, performances agronomiques...) et la puissance statistique était faible.

Ainsi pour évaluer l'efficacité de différents dispositifs spatiaux dans le contrôle de la maladie, je propose de suivre une approche de modélisation.

Dans le cadre d'une récente (2016) collaboration internationale avec le CENSA (en vue d'une affectation dans ce centre qui n'a finalement pas pu être organisée par manque de financement et par la complexité de l'administration cubaine), nous avons développé un premier modèle épidémiologique spatialisé individus centrés (collaboration avec I.Miranda, Cuba et F.Bonnot, de mon équipe BGPI). Ce modèle est un modèle qui décrit les différents états d'une surface foliaire de type SEIR et intégrant les 2 latences conidiennes et ascospores et les 2 types de sporulations (conidies et ascospores). Le modèle est résolu analytiquement. Actuellement, les simulations prédisent une absence de l'effet des dispositifs spatiaux. Cependant, nous rencontrons une réelle difficulté de paramétrage de ce modèle par manque de certaines connaissances sur les niveaux d'inoculum et les sporulations et par difficulté de relation entre les paramètres mathématiques et épidémiologiques. Nous finaliserons en 2019 le développement de ce modèle (2 communications à congrès ont déjà été faites) pour valoriser le travail fait mais avons conscience de ces limites (paramétrage et informatique).

Pour mon projet, je propose de développer un deuxième modèle épidémiologique spatialisé à partir d'une part du module épidémiologique du modèle que nous avons publié à l'échelle d'un bananier (Landry *et al.* 2017) et des ressources issues des récents travaux de Papaix *et al.* (2014) et Rimbaud *et al.* (2018) qui prennent en compte l'évolution du pathogène. En effet, ces auteurs ont développé un modèle générique démogénétique (simulant propagation la dispersion et évolution), spatialisé (dans paysage agricole) temporelle (plusieurs saisons) et stochastique (prend en compte la variabilité). Ils ont utilisé ce modèle pour une maladie fongique (rouille) des céréales, et est en cours d'adaptation pour des viroses végétales. Un package R (Landsepi) est maintenant disponible. Suite à l'obtention d'un projet de recherche EcoPhyto (sur la durabilité de la résistance du bananier), nous projetons de construire une collaboration (stagiaire, voir doctorant) avec ces auteurs (Papaix et Rimbaud) pour adapter ce modèle démogénétique à la cercosporiose noire du bananier en utilisant notre modèle épidémiologique qui simule les composantes de résistance et en prenant en compte de façon explicite à l'échelle du paysage la structure spatiale de parcellaires (Papaix *et al.*, 2014). Nous pourrions nous appuyer sur les cartographies spatiales du parcellaire réel de bananes export des Antilles (exploitations de quelques dizaines d'hectares) et de Cuba (exploitation de plusieurs centaines d'hectares) pour générer à l'aide d'un simulateur des parcellaires réalistes. Pour considérer l'évolution du champignon, nous nous appuyerons sur les connaissances issues de la thèse actuelle de T.Dumartinet pour approximer des taux de sélection/Mutation pathogène.

Nous projetons d'exploiter ce modèle de durabilité pour appuyer au déploiement des hybrides élites du Cirad (CIRAD 925) en cours de changement d'échelle chez les producteurs des Antilles et dont nous disposons des composantes de résistance et sur lequel nous étudions la durabilité (stable à ce jour). Les dispositifs spatiaux étudiés seront les mélanges variétaux à l'échelle de la parcelle, de l'exploitation et du paysage agricole. Nous tenterons de définir une gestion spatiotemporelle pour ralentir et/ou éviter les contournements de résistance.

Ce thème permettra de proposer des scénarios virtuels efficaces et durables, de déploiement de nouvelles variétés de bananiers résistantes à différentes échelles spatiales (de la parcelle au paysage). Ce thème permettra un dialogue avec les agronomes et les producteurs et les informations acquises sur les durées prédites d'efficacité des résistances (=durée avant un contournement de résistance) seront partagées avec les généticiens.

## **Axe 4 : Evaluation de méthodes de lutte efficaces et durables**

Je propose également d'évaluer l'efficacité de méthodes de lutte contre la maladie en agissant à deux niveaux : la plante (en optimisant ses performances de résistance) et une échelle spatiale supérieure à la plante (parcelles, îlot de parcelles) par la gestion spatiotemporelle de la maladie.

A l'échelle de la plante, des travaux sur l'effet de la fertilisation sur le niveau de maladie et les composantes de résistantes seront poursuivies par des expérimentations mises en place chez des partenaires de recherche (République dominicaine, Cuba). Différents types de fertilisation pourront être évalués mais l'effet de la fertilisation organique sera étudié en particulier aux Antilles où les producteurs initient une production biologique et ce dans le cadre du nouveau projet d'appui à la production (Plan Banane Durable).

Après avoir identifié des scénarios virtuels d'utilisation des hybrides résistants pour un contrôle de la maladie, je propose d'évaluer en conditions naturelles d'infestation les scénarios les plus efficaces à l'échelle de la parcelle et d'un bassin de production (îlots de parcelles, bassin de production). Il s'agira

de comparer par expérimentation les niveaux de maladies sur des bananiers résistants et sensibles cultivés en mélanges. Les critères d'évaluation des performances de l'efficacité d'un dispositif seront le niveau de maladie sur la variété sensible et la durée avant contournement sur la variété résistante.

Si les travaux de l'axe 2 nous permettent d'identifier des gènes candidats permettant de suivre l'évolution du pathogène, nous suivrons également sur les mêmes dispositifs la dynamique d'adaptation des populations pathogènes par génotypage de pools de lésions collectées à différentes dates sur les variétés résistantes. Ainsi l'efficacité d'une gestion spatiotemporelle des nouvelles variétés dépendront d'une part de la dynamique de populations mais également de son évolution.

## **Appui à la surveillance de maladie émergentes en santé végétale**

Compte-tenu des actions de prévention et de recherche réalisées pour prévenir l'arrivée de la maladie aux Antilles et pour étudier l'histoire d'invasion de la cercosporiose noire des bananiers à différentes échelles spatiales (mondiale, régionales, locales), j'ai acquis une certaine expérience sur la mise en place de réseaux de surveillance, leur fonctionnement, l'acquisition de données épidémiologiques et leurs analyses.

J'apporterai mon appui à la mise en place de réseau de surveillance aux Antilles et dans les Caraïbes de la fusariose du bananier, tropicale Race 4 (maladie d'origine tellurique qui tue les bananiers). Cette maladie est à fort risque d'introduction menace la production de Cavendish, sensible à cette maladie et pour laquelle peu de méthodes de lutte sont efficaces (Ploetz *et al.*, 2015). Cette activité de prévention est réalisée avec par Y.Chilin, ingénieur de recherches de mon équipe.

Un appui et des collaborations pourront être établies avec des collègues généticiens sur Citrus pour appuyer les réseaux de surveillance mis en place sur le citrus greening des agrumes dans les DOM.

## **Conclusion**

Ce projet a pour objectif de mieux comprendre la dynamique et l'évolution de populations pathogènes en relation avec la résistance quantitative de l'hôte. Il propose d'intégrer les connaissances acquises sur les dynamique de populations et d'évolution du pathogène dans des modèles épidémiologiques afin d'identifier des stratégies efficaces et durables de gestion spatio-temporelle des nouvelles variétés résistantes. Le projet sera appliqué à l'étude de la cercosporiose noire des bananiers.

En terme académique, ces travaux permettront de développer des méthodes et outils, en particulier des méthodes de quantifications des inoculums aériens qui pourront servir pour d'autres pathogènes à dispersion aérienne et des modèles épidémiologiques. Les travaux sur la sélection des populations pathogènes par la résistance quantitative alimenteront les rares cas d'étude de génomique des populations en pathologie végétale. Le développement de modèle démo-génétique à partir d'un modèle générique permettra de l'appliquer pour la première fois à une maladie de cultures pérenne. Ainsi, le projet contribuera à la conception de stratégies de déploiement de variétés résistantes en vue d'un contrôle efficace et durable de maladies végétales à dispersion aériennes.

# Annexes

## Annexe 1

### Liste détaillée des participations à projets de recherche

#### *En cours*

Projet EcoPhyto DuRéBan– 03/2019 à 03/2021 ; montant de la subvention : 290 Ke

Projet Agropolis E-SPACE – du 02/05/2016 au 30/09/2019; montant de la subvention : 900 Ke

Projet FEDER-MALIN du 01/01/2014 au 31/12/2020 ; montant de la subvention : 1 700 Ke

Projet FEADER : Plan Banane Durable 2 de mai 2016-mai 2020 ; montant de la subvention : 290Ke

#### *Passées (en poste en Guadeloupe)*

Projet USDA/CPHD – du 01/01/2018 au 31/12/2018 ; **montant de la subvention : 30 Ke**

Projet ANR : GANDALF – du 11/01/2013 au 31/12/2017

Action Incitatives (partenaire du sud) : 6/10- 18/11/2016 **montant de la subvention : 4ke**

Projet Interreg : CABARE – du 03/01/2011 au 08/08/2015; **montant de la subvention : 1200 Ke**

SCAC Séminaire Cuba – 2014 et 2015 (1 subvention/an) **montant de la subvention : 3ke**

CABARE WP6 – du 25/09/2015 au 29/02/2016

Projet UGPBAN INTERREG– du 16/04/2010 au 31/12/2012

Projet FEDER : GESTION DES RISQUES (3 tranches : 2008-2009 ; 2010-2011 ; 2012- 2013)

MISSION Haïti FAMV – du 03/07/2009 au 31/03/2013

Projet ANR – EMERFUNDIS -01/01/2008 à 30/06/2011

Projet FEDER : VALEXBIOTROP RISQUES (2 tranches : 2008-2009 ; 2010-2011)

Projet FEADER : Plan Banane Durable 1 2009-2010

FCR-Guadeloupe 2008 ; **montant de la subvention: 20 ke**

Projet CTPS– Banane 2007-2008

SCAC République dominicaine -2007 et 2009

FCR-Guadeloupe 2006 ; **montant de la subvention : 35ke**

#### *Passées (en poste à Montpellier)*

Projet CTPS– Banane 12/2002 -12/2005 « Gestion spatiale de nouvelles variétés de bananes résistantes aux cercosporioses dans les Antilles françaises » ; **montant de la subvention : 34ke**

Projet MOM-Banane 08/2003-12/2005 « Evaluation de l'efficacité de la résistance de nouvelles variétés de bananes pour le contrôle de la cercosporiose jaune en Guadeloupe » ; **montant de la subvention: 19ke**

Projet Fonds Commun INRA-CIRAD « Modélisation des épidémies de champignons responsables de maladies foliaires de plantes » 2002-06/2004

#### *Passées (en poste au Cameroun)*

Projet INCO-DC «Optimisation de nouvelles stratégies d'amélioration de bananiers pour les marchés locaux » 1999-2002

Projet ATP-CIRAD « Effet de la résistance du peuplement hôte sur la dynamique et la structure des populations d'agents phytopathogènes » 1999-2001

Projet IMTP-Phase 3 (International Musa Testing Program), 1999-2001

Projet CFC « Banana Improvement Program » 1995-1999

## Annexe 2

### Listes des 42 communications orales à congrès internationaux (26) et nationaux (16)

Le nom de l'orateur est souligné.

- El Hadrami A., Zapater MF., Lapeyre F., **Abadie C.**, Carlier J. (1998) ; Evaluation sur fragments foliaires en survie de la résistance partielle du bananier et de l'agressivité de *Mycosphaerella fijiensis*, agent causal de la maladie des raies noires ; Journées Jean Chevaugéon, Rencontres de Mycologie-Phytopathologie, Aussois, France
- Tomekpe K., Noupadja P., **Abadie C.**, Tchango Tchango J. and Escalant JV (1998) ; Breeding Sigatoka resistant plantains for domestic and export market ; Proceeding of XIII meeting of ACORBAT, Guayaquil, Equateur, 23-29/11/98, p 94-95 (abstract).
- Carreel F., **Abadie C.**, Carlier J., Tomekpe K., Lagoda P., Tezeas du Montcel H., Glazmann JC. and Bakry F. (1999) : Genome mapping and genetic analysis of the Black leaf streak resistance in bananas ; Proceeding of Plant and Animal Genome VII Conference, San Diego, California, United States, 17-21/01/99 (abstract).
- Carreel F., **Abadie C.**, Carlier J., Tomekpé K., Lagoda P.J.L., Bakry F (1999) Genome mapping and genetic analysis of the black leaf streak resistance in bananas ; In : *International symposium on the molecular and cellular biology of banana*. New York, Etats-Unis, Boyce Thompson Institute for Plant Research, Boyce Thompson Institute for Plant Research, 1999/03/22-25, 1 p. et Promusa III in *Infomusa* vol 8, n° 1, p2-3 (abstract).
- Fouré E., Abadie C. (1999). Lutte intégrée contre les cercosporioses des bananiers : mesures proposées pour une production bananière durable plus respectueuse de l'environnement. *Systèmes de production durable en fruits et légumes*. Montpellier : CIRAD-FLHOR, [2] p. Séminaire CIRAD-Flhor/INRA, 1999-08-30/1999-09-02, Montpellier, France.
- El Hadrami A., **Abadie C.**, Carlier J. (2000) ; Evaluation de la résistance partielle des bananiers à *Mycosphaerella fijiensis* (maladie des raies noires) en conditions contrôlées et au champ ; Journées Jean Chevaugéon, Rencontres de Mycologie-Phytopathologie, Aussois, France 5-9/03/00.
- Zapater MF, Rivas G., El Hadrami A., **Abadie C.**, Cohen S., Loubacky V., Carlier J. (2000) Populations structure of the fungus *Mycosphaerella fijiensis* at continental and local scales ; *2nd International Symposium on the Molecular and Cellular Biology of Banana, Australie, 29 octobre-3 novembre 2000*. s.l. : s.n., 1 p. International Symposium on the Molecular and Cellular Biology of Banana. 2, 2000-10-29/2000-11-03, Brisbane, Australie. and In Symposium on Durable Disease Resistance, Wageningen, The Netherlands, 28/11-1/12/00, p7.
- Zapater M.F., Rivas G.G., Abadie C., El Hadrami A., Cohen S., Loubacky V., Carlier J. (2001). Structure des populations du champignon *Mycosphaerella fijiensis* aux échelles continentales et locales [Résumé]. In : SFP. *5e Congrès de la Société Française de Phytopathologie, Angers (France), 26 - 29 mars 2001. Programme et résumés des communications*. Angers : INRA, p. 51 Congrès de la Société Française de Phytopathologie. 5, 2001-03-26/2001-03-29, Angers, France.
- Rivas-Platero G., Zapater M.F., **Abadie C.**, Carlier J. (2003) Genetica de poblaciones de *Mycosphaerella fijiensis*, agente causal de la Sigatoka negra de las musaceas en los tropicos. In Proceedings of the seminar "Manejo convencional y alternativo de la Sigatoka negra, nematodos y otras plagas asociadas al cultivo de Musaceas en los tropicos" Rivas G. and Roslaes F. Editors 180p
- Rivas G., Zapater M.F., Abadie C., Carlier J. 2004. Genetic structure of *Mycosphaerella fijiensis* populations at the continental scale [Abstract]. In : Picq Claudine (ed.), Vézina Anne (ed.). *First International congress on Musa: harnessing research for improved livelihoods*. Montpellier : INIBAP, p. 122 International Congress on Musa: Harnessing Research for Improved Livelihoods. 1, 2004-07-06/2004-07-09, Penang, Malaisie.
- Coste D., Rivas G.G., Zapater M.F., **Abadie C.**, Bonnot F., Carlier J. (2004) Isolement par la distance chez *Mycosphaerella fijiensis*, responsable de la maladie des raies noires du bananier. Journées Jean Chevaugéon, Rencontres de Mycologie-Phytopathologie, Aussois, France 18-22/01/04.

Carlier J., Coste D., Rivas G.G., Zapater M.F., **Abadie C.**, Bonnot F. (2004) Population genetic structure and dispersal of the fungal pathogen of bananas *Mycosphaerella fijiensis*. [Abstract]. In Picq C., (ed.), Vézina A., (ed.). *Harnessing research for improved livelihoods. Abstract guide*. Montpellier, France: Inibap, 113 (1 p.). International Congress on *Musa*. 1, 2004/07/06-09, Penang, Malaisie.

de Lapeyre de Bellaire L., Ngando J., **Abadie C.**, Carlier J., Fouré E. (2006). Evolution of Black Leaf Streak Disease control in the conditions of Cameroon banana plantations: how can we face the emergence of fungicide resistance? In: CORBANA/INIBAP/MUSALAC (ed.) *International congress: Black Sigatoka management in banana and plantain in Latin America and the Caribbean*, 21-23 mars 2006, San Jose, Costa Rica. Book of abstracts, p40.

**Abadie C.**, Iotti J., Teycheney P.Y. (2009) Development of surveillance networks, data exchanges and joint response strategies in the Caribbean : the French experience In : *45nd Annual Meeting of the Carribean Food Crop Society, Basse Terre, St Kitts et Nevis, July 12-15, 2009.*, [6] p. Annual Meeting of the Carribean Food Crops Society (CFCS)

Robert S., Zapater MF, **Abadie C.**, Carlier J., Ravigné V. (2010) Retracer l'expansion mondiale du champignon phytopathogène *Mycosphaerella fijiensis* *Journées Jean Chevaugéon, 8<sup>ème</sup> Rencontres de Mycologie-Phytopathologie*, Aussois, France 25-29/01/2010 (**communication orale 1<sup>er</sup> prix SFP**)

Robert S., Zapater MF, **Abadie C.**, F.Carreel, Carlier J., Ravigné V. (2010) Retracer l'expansion mondiale du champignon phytopathogène *Mycosphaerella fijiensis* : route d'expansion, perturbations démographiques et succès d'émergence. Congrès Ecologie 2010, Montpellier, France, 2-4/09/2010

**Abadie C.**, Zapater MF., Robert S., Ravigné V., Bonnot F. and Carlier J. (2011) Black leaf streak disease and eumusae leaf spot: two destructive and invasive leafspot diseases of bananas. In *47<sup>th</sup> Annual Meeting of the Caribbean Food Crops Society (CFCS)*, St Michael, Barbades, 4-6/07/2011(*communication invitée*).

Barrès B., S.Robert; **C.Abadie**, J.Carlier; C. Dutech;V. Ravigné (2012) Identifier les scénarios complexes de colonisation à l'échelle continentale des champignons phytopathogènes à l'aide des méthodes ABC. *Journées Jean Chevaugéon, 9<sup>ème</sup> Rencontres de Mycologie-Phytopathologie*, Aussois, France 16-19/01/2012.

Landry C., F. Bonnot, V. Ravigné, J. Vaillant, J. Carlier, C. Lannou, **C.Abadie** (2012) Développement d'un modèle de simulation d'une épidémie foliaire tropicale à l'échelle de la plante: cas des cercosporioses du bananier. *Journées Jean Chevaugéon, 9<sup>ème</sup> Rencontres de Mycologie-Phytopathologie*, Aussois, France 16-19/01/2012 .

Landry C., F. Bonnot, V. Ravigné, J. Vaillant, J. Carlier, **Abadie C.** (2012) Evaluation of host partial resistance efficacy to a foliar disease using a simulation modeling approach: case of *Mycosphaerella* leaf spots diseases of banana. In *Epidemiology, Canopy and Architecture international conference (ECA)*, Rennes, France 2-6/7/2012.

Cavalier A., Perez Vicente L., Montero Y., Clase Salas J., Minière L., Renfingo D., Bonnot F., **Abadie C.** (2013). Efecto de los manejos culturales sobre la severidad de la Sigatoka negra con un enfoque de encuesta epidemiológica. . In : CIRAD ; UGPBAN ; IT2. *Séminaire scientifique sur la production de banane durable dans les Caraïbes*, 2013-03-19/2013-03-215, La Havane, Cuba

**Abadie C.**, Landry C., Cavalier A., Perez V., Folgueras ML, Rengifo D., Jimenez J. (2013). Identificación y utilización de la variedades resistente las mas eficiente : modelización y efecto del ambiente sobre la resistencia. In : CIRAD ; UGPBAN ; IT2. *Séminaire scientifique sur la production de banane durable dans les Caraïbes*, 2013-03-19/2013-03-215, La Havane, Cuba.

de Lapeyre de Bellaire L., Chillet M., **Abadie C.**, Ngando J., Castelan, F. 2013. Impacto de las enfermedades foliares de Sigatoka sobre la calidad del banano. In : CIRAD ; UGPBAN ; IT2. *Séminaire International sur la recherche et le développement de méthodes de contrôle de la Maladie des Raies Noires dans la Caraïbe*. La Havane, Cuba, 19-21 mars 2013.

Landry C., Bonnot F., Ravigné V., Carlier J., Vaillant J., Abadie C. (2013). Simulation model of a tropical foliar epidemic disease at plant scale: case of black sigatoka on banana. In: R. Anguelov and E. Nikolova. *Conference BIOMATH 2013 (International conference on Mathematical Methods and Models in Biosciences)*, Sofia,

Bulgaria, 16 June to 21 June 2013. s.l. : s.n., p. 61 International conference on Mathematical Methods and Models in Biosciences, 2013-06-16/2013-06-21, Sofia, Bulgarie.

**Abadie C.** (2013). Histoire d'invasion de la maladie des raies noires et fonctionnement épidémique. In : CIRAD ; UGPBAN ; IT2. *Séminaire International sur les Cercosporioses et la production de banane durable*, Guadeloupe, 25-27 juin, 2013.

De Lapeyre de Bellaire L., Guillermet C., Le Guen R., Fouré E., Dorel M., Lescot T., **Abadie C.**, Chillet M. (2013). Conception et évaluation de SC pour cultiver des variétés sensibles de Cavendish sans lutte chimique contre la MRN. In : CIRAD ; UGPBAN ; IT2. *Séminaire International sur les Cercosporioses et la production de banane durable*, 25-26/06/2013, Guadeloupe.

Robert S. and **Abadie C.**, Zapater MF, Roussel V., Pignolet L., Ravigné V., Carlier J. (2013) Worlwide and Caribbean invasion history of the banana emergent *Mycosphaerella fijiensis* pathogen. In : eds. Borges A.L. , Lichtemberg L. *Proceedings of the 20<sup>th</sup> international meeting ACORBAT: 40 years sharing science and technology*, Fortaleza, Brésil, 9-13/09/2013 (**communication orale primée**)

Cavalier A., Perez Vicente L., Rengifo D., Minière L., Lescot T., **Abadie C.** (2013). Various environmental factors influence the black sigatoka severity on the bananas resistant hybrids = Différents facteurs environnementaux influencent la sévérité de la cercosporiose noire sur des hybrides de bananiers résistants. In : eds. Borges A.L., Lichtemberg L. *Proceedings of the 20th international meeting ACORBAT: 40 years sharing science and technology*, Fortaleza, Brésil, 9-13/09/2013.

Robert S. and **Abadie C.**, Zapater MF, Roussel V., Pignolet L., Ravigné V., Carlier J. (2013) Worlwide and Caribbean invasion history of the banana emergent *Mycosphaerella fijiensis* pathogen. II Séminaire international sur les racines, tubercules, plantains, bananiers et papayers, Cayo Santa Maria, Cuba, 22-25/10/2013

**Abadie C.**, Cavalier A., Landry C., Bonnot F., Pérez Vicente L., Rodriguez R., Montero Y., Clase Salas J., Minière L., Chilin-Charles Y., Lescot T., Rengifo D., Jimenez R., Zapater M.F., Carlier J. (2014). Various environmental factors allow to optimize the efficacy of bananas hybrids resistance against black leaf streak disease. In : *International Seminar on Plant Health for the Sustainability of the Agricultural Systems and Farmers*, La Havane, Cuba, 7-11/04/2014

**Guillermet C.**, **Fouré E.**, **Dorel M.**, **Abadie C.**, **Chillet M.**, **Lescot T.**, **De Lapeyre de Bellaire L.** (2014). Cultivar banano de tipo Cavendish de exportacion sin control quimico de la Sigatoka Negra. In : *7th International Seminar on Plant Health for the Sustainability of the Agricultural Systems and Farmers*, La Havane, Cuba, 7-11/04/2014

Landry C., **Abadie C.**, Bonnot F., Vaillant J. (2015) Evaluation des facteurs de risques liés à l'invasion de la cercosporiose noire en Martinique. Symposium « Risques et modèles en épidémiologie humaine, animale et végétale, Pointe-à-Pitre, Guadeloupe, 19-20/05/2015.

Landry C., Bonnot F., Ravigné V., Carlier J., Vaillant J., **Abadie C.** (2016) Développement et calibration d'un modèle de simulation hôte-pathogène : le cas de la cercosporiose noire du bananier. Journées Jean Chevaugéon, 11<sup>ème</sup> Rencontres de Mycologie-Phytopathologie, Aussois, France 25-29/01/2016

Landry C., Bonnot F., Carlier J., Rengifo D., Vaillant J., C. **Abadie C.** (2016) SiBaToKa model : a new tool to design efficient methods to control black sigatoka of bananas. In XXI<sup>th</sup> International meeting of ACORBAT, 19-22/04/2016, Miami, USA (*communication orale*).

Miranda I., **Abadie C.**, Bonnot F. (2017) Modelacion espacio-temporal de la dinámica de la Sigatoka negra (BLSD) en banano ; *VIII Seminario científico internacional de Sanidad Vegetal*, 10-14/04/2017, La Habana, Cuba.

**Abadie C.** (2017) SiBaToKa model : a new tool to design efficient methods to control black sigatoka of bananas. *Symposium Modélisation Mathématique en Ecologie et en Biosciences*, 13/04/2017, Petit-Bourg, Guadeloupe.

Carlier J., Zapater M-F. Bieysse D., Montero Y., Roussel V., Habas R., Ravel S., Rodriguez R., Martinez T, Perez-Vicente L., **Abadie C.** and Wright S. (2017) Detecting genes selected by quantitative resistances in the banana fungal pathogen *Mycosphaerella fijiensis* ; *Conference on population genomics of fungal and Oomycete diseases of animals and plants*, 7-11/05/2017, Ascona, Suisse.



- Landry C., Bonnot F., Miranda I., Carlier J., **Abadie C.** (2017) Nuevas herramientas para elaborar practicas eficientes para controlar la Sigatoka negra de bananos ; *IV International Symposium on Roots, Rhizomes, Tubers, Plantain, Bananas and Papaya*, 24/10-27/10/2017, Varadero , Cuba.
- Carlier J., Zapater MF, Bieysse D., Montero Y., Roussel V., Habas R., Ravel S., Rodriguez, Martinez T., Perez-Vicente L., **Abadie C.**, Wright S. (2018) Histoire des populations et adaptation à l'hôte dans les Caraïbes chez le champignon *Mycosphaerella fijiensis* parasite du bananier. *Journées Jean Chevaugéon, 12<sup>ème</sup> Rencontres de Mycologie-Phytopathologie*, 15-19/01/2018, Aussois, France
- Bonnot F., Miranda I., **Abadie C.** (2018) SECLA : Un modèle spatio-temporel de simulation de la cercosporiose noire du bananier. *Journées Jean Chevaugéon, 12<sup>ème</sup> Rencontres de Mycologie-Phytopathologie*, 15-19/01/2018 Aussois, France
- Bonnot F., Miranda I., **Abadie C.** (2018) SECLA : Modélisation spatiotemporelle de la cercosporiose noire des bananiers. *Symposium « Modélisation et Statistiques en écologie et en Biosciences »*, 15-16/05/2018, Pointe-à-Pitre, Guadeloupe
- Trouspance Y., Puech H., Merle T., Cely T., Diman C., Miath P., Lubin N., Chilin-Charles Y., Jacoby-Kaoly C., **Abadie C.** (2018) Exploitation des données d'épidémiosurveillance sur la cercosporiose noire sur plantain : outil privilégié pour raisonner la lutte à l'échelle du territoire guadeloupéen. *Symposium « Modélisation et Statistiques en écologie et en Biosciences »*, 15-16/05/2018, Pointe-à-Pitre, Guadeloupe

## Annexe 3

### Liste des rapports de projets et d'expertise (81)

- Teycheney PY, **Abadie C.**, Pradel J., Albina E. 2019. Rapport d'étape du projet FEDER-MALIN (Maladies Infectieuses) 2018 ; Neufchateau, CIRAD, 37 p.
- Teycheney PY, **Abadie C.**, Pradel J., Albina E. 2018. Rapport d'étape du projet FEDER-MALIN (Maladies Infectieuses) 2017 ; Neufchateau, CIRAD, 30 p.
- Teycheney PY, **Abadie C.**, Pradel J., Albina E. 2017. Rapport d'étape du projet FEDER-MALIN (Maladies Infectieuses) 2016 ; Neufchateau, CIRAD, 18 p.
- Teycheney PY, **Abadie C.**, Pradel J., Vachery N. 2016. Rapport d'étape du projet FEDER-MALIN (Maladies Infectieuses) 2014-2015 ; Neufchateau, CIRAD, 19 p.
- Salmon F., **Abadie C.**, Brat P., Delos J.M., Efile J.C., Guiougou C., Gravillon M.C., Hubert O., Lambert F., Lechaudel M., Leclerc N., Lubin N., Crispin R., Clotaire A., Karramkam G., Marius F., Numitor G., Ricci S., Vingadassalon F. 2016. Plan Banane Durable 2 Guadeloupe – Martinique. Plateforme de sélection de nouvelles variétés de bananiers. Rapport d'exécution année 2015. CIRAD, Montpellier, 29 p.
- Teycheney PY, Lefrançois T., Vachery N., Pradel J., **Abadie C.** 2015. Rapport final du projet FEDER- Gestion des Risques 2007-2013 ; Neufchateau, CIRAD, 75 p.
- Abadie C.**, De Lapeyre de Bellaire L., Fouré E., Guillermet C., Leguen R., Lescot T., Meynard P., Pignolet L., Tran Quoc H., Zapater M.F. 2013. Programme Interreg-Caraïbes. Poste 3 - Recherche et développement. WP2 - Echanges d'informations avec les partenaires du projet et transfert de savoir-faire en appui au développement de Systèmes de Culture innovants : Rapport d'exécution année 2012. Montpellier : CIRAD, 26p.
- Abadie C.**, Achard R., De Lapeyre de Bellaire L., Fouré E., Guillermet C., Lescot T., Meynard P., Pignolet L., Tran Quoc H., Zapater M.F. 2012. Programme Interreg-Caraïbes. Poste 3 - Recherche et développement. WP2 - Echanges d'informations avec les partenaires du projet et transfert de savoir-faire en appui au développement de Systèmes de Culture innovants : Rapport d'exécution année 2011. Montpellier : CIRAD, 57 p.
- Dorel M., Tran Quoc H., Achard R., Ripoche A., Guillermet C., De Lapeyre de Bellaire L., Fouré E., **Abadie C.**, Landry C. 2012. Programme Interreg-Caraïbes. Poste 3 - Recherche et développement. WP1 - Mise au point et évaluation de systèmes de culture innovants à base de bananiers : Rapport d'exécution année 2011. Montpellier : CIRAD, 30-[15] p.
- De Lapeyre de Bellaire L., **Abadie C.**, Carlier J., Ngando J. E., Kema G.H.J. 2010. *Mycosphaerella* foliar diseases of bananas: towards an integrated protection. [Online]. [S.l.] : ENDURE, [6] p.. (Etude de cas sur la banane - Guide : De la théorie à la pratique, 2).[20100315]. <http://www.endure-network.eu/content/download/5208/41793/file/Banana%20Case%20Study%20Guide%20Number%202.pdf>
- De Lapeyre de Bellaire L., Zapater M.F., Pignolet L., **Abadie C.**, Fouré E. 2010. Evaluation de la sensibilité des souches de *Mycosphaerella fijiensis*, agent de la Maladie des Raies Noires des bananiers, aux fongicides systémiques, dans les populations migrantes détectées en Martinique. Montpellier : CIRAD, 10 p.
- Abadie C.**, Teycheney P.Y. 2009. Compte rendu de mission à Cuba, 24/5- 6/6/2008. Montpellier : CIRAD, 15 p.
- Abadie C.**, Teycheney P.Y. 2008. Rapport d'exécution du projet FCR «Atelier régional sur le diagnostic de la maladie des raies noires et des virus des bananiers et plantains» en Janvier 2008. Neufchateau : CIRAD, 20 p
- Abadie C.**, Teycheney P.Y. 2007. Compte rendu de mission en République Dominicaine du 22 au 27 octobre 2007. Montpellier : CIRAD, 24 p.
- Abadie C.** 2007. Rapport d'exécution du projet FCR «Organisation d'un atelier régional sur la lutte contre les cercosporioses des bananiers dans les Caraïbes» en Octobre 2006. Neufchateau : CIRAD, 29 p.
- Abadie C.** 2007. Gestion spatiale de nouvelles variétés de bananes résistantes aux cercosporioses dans les Antilles françaises : rapport d'exécution du projet CTPS, 12/2002 à 12/2005. Montpellier : CIRAD-FLHOR, 24 p.
- Abadie C.** 2006. Rapport d'exécution du projet MOM n°2D 01/1 « Evaluation de l'efficacité de la résistance de nouvelles variétés de bananes pour le contrôle de la cercosporiose jaune en Guadeloupe ». Neufchateau, CIRAD-FLHOR, 21 p.
- Chilin-Charles Y., Zapater M.F., **Abadie C.**, De Lapeyre de Bellaire L. 2005. Evaluation du niveau de sensibilité aux triazoles, de populations de *Pseudocercospora musae*, isolées dans différentes zones de la bananeraie

- martiniquaise : campagne de monitoring d'octobre 2005. Neufchateau: CIRAD-FLHOR, 25 p.
- Abadie C.** 2005. Rapport d'expertise pour un cabinet européen sur l'évaluation de contrôle des cercosporioses dans les plantations SBBS, au Suriname –octobre 2004 à Juin 2005. Montpellier : CIRAD-FLHOR, 39 p.
- Abadie C.** 2005. Gestion spatiale de nouvelles variétés de bananes résistantes aux cercosporioses dans les Antilles françaises : rapport d'étape du projet CTPS janvier-décembre 2004. Montpellier : CIRAD-FLHOR, 16 p.
- Abadie C.** 2004. Gestion spatiale de nouvelles variétés de bananes résistantes aux cercosporioses dans les Antilles françaises : rapport d'étape du projet CTPS mars-décembre 2003. Montpellier : CIRAD-FLHOR, 13 p.
- Abadie C.** 2004. Gestion spatiale de nouvelles variétés de bananes résistantes aux cercosporioses dans les Antilles françaises : rapport d'étape du projet CTPS décembre 2002-mars 2003. Montpellier: CIRAD-FLHOR, 8p.
- Abadie C.** 2004. Coopération Française. Rapport de mission : La Dominique, Saint Vincent, Sainte Lucie du 8 au 17 novembre 2004. Montpellier : CIRAD-FLHOR, 18 p.
- Bakry F., Carreel F., Tomekpé K., **Abadie C.**, Carlier J. 2003. Rapport final du Projet INCO-DC «Optimisation de nouvelles stratégies d'amélioration de bananiers pour les marchés locaux » de 1999-2002 Montpellier : CIRAD-FLHOR, 50 p.
- Abadie C.**, Cohan JP. 2002. Recherches sur la sensibilité des souches de *Mycosphaerella fijiensis*, agent de la maladie des raies noires des bananiers, aux fongicides utilisés dans les plantations industrielles SPNP/SBM/PHP au Cameroun. *Document CRBP 2002/258*.
- Cohan JP., **Abadie C.** 2002. Recherches sur la sensibilité des souches de *Mycosphaerella fijiensis*, agent de la maladie des raies noires des bananiers, à quatre triazoles sur quelques secteurs des plantations industrielles SPNP/SBM/PHP au Cameroun. *Document CRBP 2002/259*.
- Fouré E., **Abadie C.**, Wamba A. 2001. Efficacités fongicides comparées du BUMPER et du TILT sur la maladie des raies noires des bananiers au Cameroun. *Document CRBP 2001/232*.
- Fouré E., **Abadie C.**, Wamba A. 2001. Efficacités fongicides comparées des deux fongicides de la famille des morpholines : la Calixine 86 OL et la Calixine 75 EC sur la maladie des raies noires des bananiers au Cameroun. Essai de prévilgarisation. *Document CRBP 2001/235*.
- Fouré E., **Abadie C.**, Wamba A. 2001. Efficacités fongicides comparées des deux fongicides de la famille des triazoles : le Caramba 90 SL et le Tilt sur la maladie des raies noires des bananiers au Cameroun. Essai de Prévilgarisation. *Document CRBP 2001/236*.
- Abadie C.**, Fouré E. 2001. Recherches sur la sensibilité des souches de *Mycosphaerella fijiensis*, agent de la maladie des raies noires des bananiers, aux fongicides utilisés dans les plantations industrielles Del MONTE au Cameroun. *Document CRBP 2001/240*.
- Abadie C.**, Fouré E. 2001. Recherches sur la sensibilité des souches de *Mycosphaerella fijiensis*, agent de la maladie des raies noires des bananiers, aux fongicides utilisés dans les plantations industrielles SAM/SPM/SPS au Cameroun. *Document CRBP 2001/241*.
- Abadie C.**, Fouré E. 2001. Recherches sur la sensibilité des souches de *Mycosphaerella fijiensis*, agent de la maladie des raies noires des bananiers, aux fongicides utilisés dans les plantations industrielles AGRISOL au Cameroun. *Document CRBP 2001/242*.
- Abadie C.**, Fouré E. 2001. Recherches sur la sensibilité des souches de *Mycosphaerella fijiensis*, agent de la maladie des raies noires des bananiers, aux fongicides utilisés dans les plantations industrielles SPNP/SBM/PHP au Cameroun. *Document CRBP 2001/243*.
- F. TALLEC, M.KWA, A. BIKOI, S. MESSAIEN, **C. ABADIE** et R.ACHARD. 2001. Synthèse des résultats de l'observatoire agronomique et phytosanitaire. *Document CARBAP 2001/250*.
- Abadie C.** 2001. Assessment of *Mycosphaerella fijiensis* populations sensitivity, the causal agent of black leaf streak disease of banana, to three fungicides of SYNGENTA in Del Monte plantations in Cameroon. *Document CARBAP 2001/251*.
- Abadie C.** 2001. Assessment of *Mycosphaerella fijiensis* populations sensitivity, the causal agent of black leaf streak disease of banana, to three fungicides of SYNGENTA in SAM/SPM/SPS plantations in Cameroon. *Document CARBAP 2001/252*.
- Abadie C.** 2001. Assessment of *Mycosphaerella fijiensis* populations sensitivity, the causal agent of black leaf streak disease of banana, to three fungicides of SYNGENTA in Agrisol plantations in Cameroon. *Document CARBAP 2001/253*.

- Abadie C.** 2001. Assessment of *Mycosphaerella fijiensis* populations sensitivity, the causal agent of black leaf streak disease of banana, to three fungicides of SYNGENTA in SPNP/SBM/PHP plantations in Cameroon. *Document CARBAP 2001/254*.
- Abadie C.** 2001. Recherches sur la sensibilité des souches de *Mycosphaerella fijiensis*, agent de la maladie des raies noires des bananiers, aux fongicides utilisés dans les plantations industrielles SAM/SPM/SPS au Cameroun. *Document CRBP 2001/255*.
- Abadie C.** 2001. Recherches sur la sensibilité des souches de *Mycosphaerella fijiensis*, agent de la maladie des raies noires des bananiers, aux fongicides utilisés dans les plantations industrielles AGRISOL au Cameroun. *Document CRBP 2001/256*.
- Abadie C.,** Fouré E.2000. Recherches sur la sensibilité des souches de *Mycosphaerella fijiensis*, agent de la cercosporiose noire des bananiers, aux fongicides utilisés en plantations industrielles SPNP—SBM-PHP-SAB. *Document CRBP 2000/201*.
- Abadie C.,** Andjengo E., Fouré E.2000. Evaluation de l'utilisation des kits Insight pour détecter la maladie des raies noires en plantation industrielle de bananes dessert. *Document CRBP 2000/202*.
- Abadie C.,** Fouré E.2000. Recherches sur la sensibilité des souches de *Mycosphaerella fijiensis*, agent de la cercosporiose noire des bananiers, aux fongicides utilisés dans les plantations industrielles Del Monte. *Document CRBP 2000/209*.
- Fouré E., **Abadie C.,** Wamba A. 2000. Efficacités fongicides comparées du VOLLEY et de la CALIXINE sur la maladie des raies noires des bananiers au Cameroun. Essai de bioefficacité. *Document CRBP 2000/210*.
- Fouré E., **Abadie C.,** Wamba A. 2000. Efficacités fongicides comparées du GRO 110 00 F et du BANKIT sur la maladie des raies noires des bananiers au Cameroun. Essai de bioefficacité. *Document CRBP 2000/211*.
- Fouré E., **Abadie C.,** Wamba A. 2000. Efficacités fongicides comparées de l'IMPULSE 800 EC et de la CALIXINE sur la maladie des raies noires des bananiers au Cameroun. *Document CRBP 2000/212*.
- Fouré E., **Abadie C.,** Wamba A. 2000. Efficacités fongicides comparées du BELLKUTE 300 EW et du VONDOZEB sur la maladie des raies noires des bananiers au Cameroun. *Document CRBP 2000/213*.
- Fouré E., **Abadie C.,** Wamba A. 2000. Efficacités fongicides comparées du SIGANEX (Pyriméthanil 600 SC) et de la CALIXINE 75 sur la maladie des raies noires des bananiers au Cameroun. *Document CRBP 2000/214*.
- Abadie C.,** Fouré E.2000. Recherches sur la sensibilité des souches de *Mycosphaerella fijiensis*, agent de la cercosporiose noire des bananiers, aux fongicides utilisés dans les plantations industrielles SPNP-SBM-PHP-SAB. *Document CRBP 2000/218*.
- Abadie C.,** Fouré E.2000. Recherches sur la sensibilité des souches de *Mycosphaerella fijiensis*, agent de la maladie des raies noires des bananiers, aux fongicides utilisés dans les plantations industrielles Del MONTE. *Document CRBP 2000/221*.
- Abadie C.,** Fouré E.2000. Recherches sur la sensibilité des souches de *Mycosphaerella fijiensis*, agent de la cercosporiose noire des bananiers, aux fongicides utilisés dans les plantations industrielles SPNP-SBM-PHP-SAB.— Complément du Document CRBP 218/2000. *Document CRBP 2000/222*.
- FOGAIN R., MOULIOM PEFOURA A., **C. ABADIE,** MESSIAEN S. et E. FOURE. 2000. Pest and diseases of bananas and plantains in Cameroon : Importance and control strategies. *Document CRBP 2000/225*, 23 p.
- Bakry F., Carreel F., Tomekpé K., Abadie C., Carlier J.** 1999. Cartographie et marquage des gènes utiles : bananier. In : CIRAD-AMIS. *Programme BIOTROP. Fiches-activités 1998*. Montpellier : CIRAD-AMIS, p.25-26.
- Abadie C.,** Escalant JV.1999. Efficacités fongicides comparées de l'ANVIL 25 SC et du BAYCOR sur la cercosporiose noire du bananier en plantation industrielle au Cameroun. *Document CRBP 99/169*.
- Abadie C.,** Escalant JV.1999. Efficacités fongicides comparées de l'OPAL et du BAYCOR sur la cercosporiose noire du bananier en plantation industrielle au Cameroun. *Document CRBP 99/170*.
- Abadie C.,** Escalant JV.1999. Efficacités fongicides comparées de l'INDAR 25 OF et du BAYCOR sur la cercosporiose noire du bananier en plantation industrielle au Cameroun. *Document CRBP 99/171*.
- Abadie C.,** Escalant JV.1999. Efficacités fongicides comparées du CARAMBA 200 EC et du BAYCOR sur la cercosporiose noire du bananier en plantation industrielle au Cameroun. *Document CRBP 99/172*.
- Abadie C.,** Escalant JV.1999. Recherches sur les sensibilités des souches de *M. fijiensis*, agent de la cercosporiose noire des bananiers, aux principaux fongicides utilisés en plantations industrielles SPNP-SBM-PHP-SAB. *Document CRBP 99/176*.

- Abadie C.**, Escalant JV.1999. Efficacités fongicides comparées de l'OPAL (époxyconazole) et du TILT (propiconazole) sur la cercosporiose noire du bananier au Cameroun. *Document CRBP 99/178*.
- Abadie C.** 1999. Evaluation de la campagne de « Monitoring Résistance Cercosporioses » en Côte d'Ivoire. Rapport de mission. *Document CRBP 99/179*.
- P. NOUPADJA, J. TCHANGO-TCHANGO, **Abadie C.**, K. TOMEKPE. 1999. Evaluation de cultivars exotiques de bananiers en vue de la diversification de la production au Cameroun. *Document CRBP 99/180*.
- Abadie C., Guerreiro M., Fogain R.,** Fouré E.1999. Stratégies de lutte contre la maladie des raies noires et les nématodes au Cameroun, Recherches sur l'efficacité du Foséthyl-AL (ALIETTE) appliqué en injection. *Document CRBP 99/183*.
- Abadie C.**, Fouré E.1999. Recherches sur la sensibilité des souches de *Mycosphaerella fijiensis*, agent de la maladie des raies noires des bananiers, à l'azoxystrobine en conditions de laboratoire. *Document CRBP 99/186*.
- Fouré E., **Abadie C.**, Wamba A. 1999. Efficacités comparées du CAIMAN 500 OL et du VONDOZEB 300 OL sur la maladie des raies noires des bananiers au Cameroun. *Document CRBP 99/190*.
- Fouré E., **Abadie C.**, Wamba A. 1999. Efficacités fongicides comparées du KZ 165 et de l'AMISTAR sur la maladie des raies noires des bananiers au Cameroun. *Document CRBP 99/191*.
- Fouré E., **Abadie C.**, Wamba A. 1999. Efficacités comparées du Pyriméthanil et du Propiconazole sur la maladie des raies noires des bananiers au Cameroun. *Document CRBP 99/192*.
- Abadie C.**, Fouré E.1999. Recherches sur la sensibilité des souches de *Mycosphaerella fijiensis*, agent de la maladie des raies noires des bananiers, aux fongicides utilisés dans les plantations DEL MONTE. *Document CRBP 99/196*.
- Fouré E., **Abadie C.**, Wamba A. 1999. Efficacités fongicides comparées de l'IMINOCTADINE et du PROPICONAZOLE sur la maladie des raies noires des bananiers au Cameroun. *Document CRBP 99/198*.
- Fouré E., **Abadie C.**, Wamba A. 1999. Efficacités fongicides comparées de deux fongicides de la famille des Strobilurines, le TEGA 75 EC et le BANKIT sur la maladie des raies noires des bananiers au Cameroun. Evaluation de l'efficacité d'un activateur des défenses naturelles de la plante : le Boost 500 SC. *Document CRBP 99/199*.
- Abadie C.** 1998. Caractérisation de la résistance partielle de bananiers et plantains vis-à-vis de la maladie des raies noires. *Document CRBP 98/154*.
- Escalant JV., **Abadie C.**, 1998. Recherches sur les sensibilités des souches de *M. fijiensis*, agent de la cercosporiose noire des bananiers, aux principaux fongicides utilisés en plantations industrielles SPNP-SBM-PHP-SAB. Avril 98. *Document CRBP 98/155*.
- Escalant JV., **Abadie C.**, 1998. Recherches sur les sensibilités des souches de *M. fijiensis*, agent de la cercosporiose noire des bananiers, aux principaux fongicides utilisés en plantations industrielles DEL MONTE. Avril 98. *Document CRBP 98/156*.
- Abadie C.**, Escalant JV.1998. Efficacités fongicides comparées du VONDOZEB 42 SC et du DITHANE F448 sur la cercosporiose noire du bananier en plantation industrielle au Cameroun. *Document CRBP 98/158*.
- Escalant JV., **Abadie C.**, 1998. Recherches sur les sensibilités des souches de *M. fijiensis*, agent de la cercosporiose noire des bananiers, aux principaux fongicides utilisés en plantations industrielles DEL MONTE. Novembre 98. *Document CRBP 98/162*.
- Abadie C.**, Escalant JV.1998. Efficacités fongicides comparées du SIRIS 075 EC (méthoxyacrilate), du BANKIT (méthoxyacrilate) et du TILT (propiconazole) sur la cercosporiose noire du bananier au Cameroun. *Document CRBP 98/167*.
- Abadie C.**, Escalant JV.1998. Evaluation de l'efficacité de l'activateur BOOST BION SC 500 sur la tolérance des bananiers à la cercosporiose noire du bananier au Cameroun. *Document CRBP 98/168*.
- Abadie C.**, Guerreiro M. 1997. Efficacités fongicides comparées du Sico (triazole) et du Tilt (triazole) sur la cercosporiose noire du bananier en plantation industrielle au Cameroun. *Document CRBP 97/142*.
- Abadie C.**, Guerreiro M. 1997. Efficacités fongicides comparées du Bankit (ICI A5504 méthoxyacrilate) et du Tilt (triazole) sur la cercosporiose noire du bananier en plantation industrielle au Cameroun. *Document CRBP 97/143*.
- Abadie C.**, Guerreiro M. 1997 Efficacités fongicides comparées du Trical (triadiméfon) et de l'Orphée Plus (triadiméfon+tridémorphe) et du Tilt (triazole) sur la cercosporiose noire du bananier en plantation industrielle au Cameroun. *Document CRBP 97/144*.
- Abadie C.**, Guerreiro M. 1997. Efficacités fongicides comparées d'une nouvelle formulation de propiconazole

(REFERENCE) et d'une formulation homologuée (TILT) sur la cercosporiose noire du bananier au Cameroun. *Document CRBP 97/145*.

**Abadie C.,** Guerreiro M. 1997. Efficacités fongicides comparées du metconazole (CARAMBA) et du propiconazole (TILT) sur la cercosporiose noire du bananier en plantation industrielle au Cameroun. *Document CRBP 97/146*.

**Abadie C.,** Escalant JV. 1997. Recherches sur les sensibilités des souches de *M. fijiensis*, agent de la cercosporiose noire des bananiers, aux principaux fongicides utilisés en plantations industrielles SPNP-SBM-PHP-SAB. *Document CRBP 97/148*.

**Abadie C.,** Achard R., Fogain R. 1997. Plantation TEUGUIA S.A. : rapport d'expertise agronomique. Njombé : CRBP, 6 p.

# Références bibliographiques

- Anderson PK, Cunningham AA, Patel NG, *et al.* 2004. Emerging infectious diseases of plants: pathogen pollution, climate change and agrotechnology drivers. *Trends in Ecology & Evolution* **19**, 535-544.
- Bakry F., Carreel, F., Jenny, C., Horry, J.P. 2009. Genetic improvement of banana. In: Jain Shri Mohan and Priyadarshan P.M. (eds.). *Breeding plantation tree crops: tropical species*. Springer, New York, USA. pp. 3-50.
- Bourget R., Chaumont L., Durel CE, Sapoukhina N. 2015. Sustainable deployment of QTLs conferring quantitative resistance to crops: first lessons from a stochastic model. *New Phytologist* 206 (3) : 1163-1171
- Brown JKM, Hovmoller MS. 2002. Epidemiology - Aerial dispersal of pathogens on the global and continental scales and its impact on plant disease. *Science* **297**, 537-541.
- Carisse O., Tremblay DM, Lefebvre A. 2014. Comparison of *Botrytis cinerea* airborne inoculum progress curves from raspberry, strawberry and grape plantings. *Plant Pathol.* 63, 983-993
- Carrier J., Lebrun MH, Zapater MF, Dubois C., Mourichnon X. 1996. Genetic structure of the global population of banana black leaf streak fungus, *Mycosphaerella fijiensis*. *Molecular Ecology*, 5 : 499-510
- Catterall S., Cook A. R., Marion G., Butler A., Hulme PE. 2012. Accounting for uncertainty in colonisation times : a novel approach to modelling the spatio-temporal dynamics of alien invasions using distribution data. *Ecography*, 35(10) :901–911.
- Cook A., Marion G., Butler A., Gibson,G. 2007. Bayesian inference for the spatio-temporal invasion of alien species. *Bulletin of Mathematical Biology*, 69 :2005–2025.
- Cornuet J-M, Ravigne V, Estoup A. 2010. Inference on population history and model checking using DNA sequence and microsatellite data with the software DIYABC (v1.0). *Bmc Bioinformatics* 11.
- Corwin JA., Kliebenstein DJ. 2017. Quantitative Resistance: More than just perception of a pathogen. *The Plant Cell.* 29 : 655-665
- Desprez-Loustau, M.-L., Robin, C., Buée, M., Courtecuisse, R., Garbaye, J., Suffert, F., Sache, I., & Rizzo, D. M. 2007. The fungal dimension of biological invasions. *Trends in Ecology & Evolution* 22: 472–80.
- Doras C. 2008. Role of nutrients in controlling plant diseases in sustainable agriculture. A review. *Agron. Sustain.Dev* 28 : 33-46
- El Hadrami A. 2000. Caractérisation de la résistanc e partielle des bananiers à la maladie des raies noires et évaluation de la variabilité du l'agressivité de l'agent causal, *Mycosphaerella fijiensis*. Thèse de doctorat, Un. De Gembloux, Belgique. 153p.
- Estoup, A., & Guillemaud, T. 2010. Reconstructing routes of invasion using genetic data: why, how and so what? *Molecular Ecology* 19: 4113–4130.
- Fabre F., Rousseau E., Mailleret L., Moury B. 2015. Epidemiological and evolutionary management of plant resistance: optimizing the deployment of cultivar mixtures in time and space in agricultural landscapes. *Evolutionary Applications* ISSN 1752-4571 : 919-932
- Henderson, J., Grice, K., Pattemore, J., Peterson, R. and Aitken, E. 2003. Improved PCR-based detection of Sigatoka disease and black leaf streak disease in Australian banana crops. In: Jacome, L., Lepoivre, P.,

- Marín, D., Ortiz, R., Romero, R. and Escalant, J.V. (eds.). *Mycosphaerella Leaf Spot Diseases of Bananas: Present Status and Outlook. Proceedings of the Workshop on Mycosphaerella Leaf Spot Diseases, San José, Costa Rica, 20–23 May 2002*. Montpellier: The International Network for the Improvement of Banana and Plantain. pp. 59–64.
- Gaulh F. 1994. Epidemiology and ecology of black sigatoka (*Mycosphaerella fijiensis*) on plantain and banana (*Musa* spp.) in Costa Rica, Central America. The International Network for the Improvement of Banana and Plantain. Montpellier, France. 120p
- Guzmán M., Pérez-Vicente L., Carlier J., Abadie C., de Lapeyre de Bellaire L., Carreel F., Marín D.H., Romero R.A., Gauhl F., Pasberg-Gauhl C., Jones D.R. 2018. Black leaf streak. In: Handbook of diseases of banana, Abacá and Enset. Jones, David R. (ed.). Wallingford: CABI, 41-115. ISBN 978-1-78064-719-7 (632p)
- Kennedy R., Wakeham AJ. 2015. Measuring biological particles in the air using the Hirst type spore trap: aerobiology in the age of genomics. *Ann; of Applied Biology* 166:1-3
- Kriticos DJ, Maywald GF, Yonow T, Zurcher EJ, Herrmann NI, Sutherst RW. 2015. CLIMEX Version 4: Exploring the Effects of Climate on Plants, Animals and Diseases. CSIRO, Canberra
- Leblois R, Rousset F, Estoup A (2004) Influence of spatial and temporal heterogeneities on the estimation of demographic parameters in a continuous population using individual microsatellite data. *Genetics* 166: 1081–1092.
- Madden L., Hughes G., Van den Bosch F. 2007. The plant diseases epidemics. American Phytopathological Society, 2007, 421 p
- McDonald B. A., Linde C. 2002. Pathogen population genetics, evolutionary potential, and durable resistance. *Annual Review of Phytopathology* 40:349–379.
- Mundt C. 2002. Use of multiline cultivars and cultivar mixtures for disease management. *Annu. Rev. Phytopathol.* 40, 381–410.
- Mundt C. 2014. Durable resistance: A key to sustainable management of pathogens and pests. *Infection, Genetics and Evolution* 27 (2014) 446–455
- Papaïx, J., S. Touzeau, H. Monod, C. Lannou 2014. Can epidemic control be achieved by altering landscape connectivity in agricultural systems? *Ecological Modelling* 284:35–47.
- Perrier X., Edmond De Langhe *et al.* 2011. Multidisciplinary perspectives on banana (*Musa* spp.) domestication. *PNAS* 108 (28) 11311-11318
- Pennisi E. 2010. Armed and dangerous. *Science* 327, 804-805.
- Perrier X, De Langhe E, Donohue M, Lentfer C, Vrydaghs L, Bakry F, Carreel F, Hippolyte I, Horry JP, Jenny C, *et al.* 2011. Multidisciplinary perspectives on banana (*Musa* spp.) domestication. *Proc Natl Acad Sci USA* 108:11311-11318.
- Parlevliet JE, 2002. Durability of resistance against fungal, bacterial and viral pathogens: present situation. *Euphytica* 124, 147–56.
- Ploetz, R.2007. Diseases of tropical perennial crops: challenging problems in diverse environments. *Plant Disease* 91, 644–653.
- Ploetz, R.C., Kema, G.H.J., Ma, L.J. 2015. Impact of diseases on export and smallholder production of banana. *Annual Review of Phytopathology* 53, 269-288.



- Poeydebat C., Carval D., Tixier P., Daribo MO, de Lapeyre de Bellaire L. 2018. Ecological regulation of Black Leaf Streak Disease driven by plant richness in banana agrosystems. *Phytopathology* 108 :1184-1195.
- Ravigné V., Lemesle V., Walter A., Mailleret L., Hamelin F. 2017. Mate limitation in fungal plant parasites can lead to cyclic epidemics in perennial host populations. *Bull. Math. Biology* 79 (3):430-447
- Rimbaud L, Papaix J, Rey J-F, Barrett LG, Thrall PH 2018; Assessing the durability and efficiency of landscape-based strategies to deploy plant resistance to pathogens. *PLoS Comput Biol* 14(4): e1006067.
- Rieux A., Soubeyrand S., Bonnot, F., Klein E., Ngando J., Mehl A., Ravigné V., Carlier J., de Lapeyre de Bellaire L. 2014. Long-distance wind-dispersal of spores in a fungal plant pathogen: estimation of anisotropic dispersal kernels from an extensive field experiment. *Plos One* 9(8): e0103225
- Savage D., Barbetti MJ., MacLeod W., Salam M, Renton M. 2012. Mobile traps are better than stationary traps for surveillance of airborne fungal spores. *Crop Protection* 36, 23-30
- Vanderplanck J.E. 1984. Disease resistance in plants. Academic Press, Inc (London) LTD, United Kingdom, ISBN 0-12-711442-4, 193p.
- West JS, Kimber RB. 2015. Innovations in air sampling to detect plant pathogens. *Ann. Applied Biology* 166 : 4-17

Tirés à part